



Copyright Pedro José Almodovar de Sousa, FCT/UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Doutor António Pedro de Nobre Carmona Rodrigues, pelo apoio e orientação, essenciais na realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Eng^o. João Maria Matos Lopes da Fonseca, pela ajuda inestimável na área da modelação, bem como pela disponibilização de material bibliográfico.

À Dr.^a Maria do Rosário Duarte, pela sua disponibilidade e pronta ajuda na busca e recolha de material bibliográfico actual e difícil de encontrar.

A toda a minha família, em especial à minha esposa e ao meu filho, que me apoiaram e acreditaram que era capaz.

A todos os meus amigos e amigas pelo apoio, incentivo, compreensão e acima de tudo amizade.

Aos Serviços Municipalizados de Água e Saneamento de Loures (SMAS), ao seu Presidente, e particularmente ao Eng.^o Filipe Teixeira, pela disponibilização de dados relativos aos sistemas de drenagem na bacia em estudo e a série de precipitação de S. João da Talha.

Muito obrigado a todos.



Resumo

O comportamento das águas pluviais em meio urbano é muito diferente do que ocorre em ambientes naturais, principalmente devido à elevada percentagem de superfícies impermeáveis nas nossas cidades. Temos maiores volumes de escoamento gerados; maiores velocidades de escoamento; menor retenção de contaminantes difusos; e propagação rápida para jusante de problemas de cheias e de qualidade da água.

Presentemente, a gestão de águas pluviais em meio urbano começa a ser encarada numa perspectiva de aproximação ao comportamento dos meios naturais. A Drenagem Urbana Sustentável está a assumir-se como um conceito de gestão que tem como objectivo gerir a água de uma forma “descentralizada”, promovendo localmente a sua infiltração e retenção distribuídas por toda a bacia.

O objecto deste trabalho foi a avaliação do efeito da rugosidade dos sistemas de drenagem sobre os caudais de ponta de cheia. Para isso propôs-se uma solução de drenagem com escoamento superficial em paralelo com os colectores pluviais, dividindo a drenagem entre os dois meios.

Baseado nas curvas de intensidade-duração-frequência para a maior parte do território nacional, bem como em eventos de precipitação registados, abordou-se o problema criando um modelo conceptual com o programa informático StormWater Management Model (SWMM 5) da Environment Protection Agency (EPA), para comparar os caudais de ponta de sistemas de drenagem pluvial com ou sem o apoio de estruturas de transporte de caudais com rugosidades aumentadas.

Foram considerados diversos cenários, com diferentes rugosidades, inclinações do terreno e dimensão dos sistemas. Os resultados das simulações indicam reduções de caudais de ponta na ordem dos 30% resultantes do escoamento superficial de parte dos caudais, principalmente devido ao aumento de rugosidade que a drenagem à superfície pode proporcionar.

Palavras-chave: drenagem urbana sustentável; águas pluviais; modelação informática; SWMM; resistência ao escoamento; atenuação de caudais de ponta



Abstract

Stormwater behaviour in urban areas differs greatly from what happens in natural environments, mainly due to the high percentage of impervious surfaces in our cities. We have greater runoff volumes; greater flow velocity; less retention of diffuse contaminants; and rapid downstream propagation of flooding and water quality problems.

Currently, a new trend in urban stormwater management attempts to mimic the behaviour of natural systems. Sustainable Urban Drainage is emerging as a concept of management that aims to deal with water in a “decentralized” manner, by locally promoting infiltration and retention, throughout the catchment.

The object of this work has been the evaluation of conveyance systems’ roughness on peak flows. To do so, a drainage solution was proposed that combines superficial flow in parallel with conventional drainage pipes, dividing stormwater between the two conveyance mediums.

Based on the intensity-duration-frequency curves for most of the country and on recorded rain events, the approach to the problem was the creation of a conceptual model with the Environment Protection Agency’s (EPA) software StormWater Management Model (SWMM 5) to compare the peak flows of drainage systems with and without the aid of conveyance structures with increased roughness.

Several scenarios were considered, with different roughness, slopes and system dimensions. Simulation results indicate peak flow reductions around 30% due to superficial conveyance of part of the stormwater, mainly because of roughness increases that shallow swales can provide.

Keywords: sustainable drainage systems; stormwater; computer modelling; SWMM; flow resistance; peak flow attenuation



Índice de Matérias

1. Introdução	1
2. Objectivos	5
3. Enquadramento Histórico	7
4. Drenagem Urbana Sustentável	11
4.1 Sistemas Centralizados vs. Sistemas Descentralizados	11
4.2 Drenagem Urbana Sustentável no mundo	12
4.3 Técnicas de Controlo na Origem	14
5. Base de Estudo – Bacia urbana de Sacavém	27
6. Metodologia	29
6.1 Modelos	32
6.2 Dados de precipitação	37
7. Simulações	41
7.1 Tempos de Concentração	44
8. Apresentação e discussão de resultados	47
8.1 Simulações com modelos simplificados – canais vs colectores	47
8.2 Simulações com modelos representando pequenos arruamentos – Sistemas mistos de canais e colectores	51
8.3 Simulações com eventos de precipitação registados	57
8.4 Ajustes ao modelo em função dos resultados	66
8.5 Discussão de padrões e tendências nos resultados	668
9. Conclusões	77
9.1 Recomendações	77
Bibliografia	79



Índice de Figuras

Figura 1.1- Variação relativa das componentes do ciclo hidrológico em função da impermeabilização.....	1
Figura 4.1 – Cadeia de gestão na drenagem sustentável.....	13
Figura 4.2 - Área de bioretenção associada a estacionamento	15
Figura 4.3 - Faixa filtrante entre estacionamento e trincheira de infiltração	17
Figura 4.4 - Pavimento permeável sobre camada de gravilha.....	18
Figura 4.5 - Telhado verde extensivo	20
Figura 4.6 - Grelha de remoção de detritos grosseiros em SAAP	21
Figura 4.7 - Esquema de cisterna de jardim com volume reservado a atenuação	22
Figura 4.8 - Vala revestida com vegetação para transporte de caudais em tempo de chuva.....	23
Figura 4.9 - Vala revestida com vegetação em zona urbana consolidada	25
Figura 5.1 - Delimitação da bacia de Sacavém	27
Figura 6.1 - Arruamento no bairro dos Terraços da Ponte.....	30
Figura 6.2 - Grelhas de enrelvamento em betão	31
Figura 6.3 - Esquema do modelo simplificado – gerado em SWMM 5.....	33
Figura 6.4 - Esquema comparativo do arruamento com drenagem convencional vs arruamento com canais laterais.....	35
Figura 6.5 - Esquema do modelo de comparação de arruamentos	36
Figura 6.6 - Hietogramas baseados nas IDF de Lisboa, para T = 2, 20 e 100 anos	38
Figura 6.7 - Hietograma retirado da série de São João da Talha de 2010, respeitante ao dia 12 de Janeiro, com o pico às 10h12.....	38
Figura 6.8 - Hietograma de 8/10/2004.....	40
Figura 6.9 - Hietograma de 23/10/1999.....	40
Figura 7.1 - Esquema do modelo simplificado duplo em paralelo.....	42
Figura 7.2 - Esquema do modelo de comparação de arruamentos, duplo, em paralelo	43
Figura 7.3 - Esquema do modelo simplificado duplo em série.....	43
Figura 7.4 - Esquema do modelo de comparação de arruamentos, duplo, em série	44
Figura 8.1 - Efeitos da rugosidade na atenuação do caudal de ponta, para comparação de colectores simples com canais simples (tudo com $i = 1\%$), sujeitos à precipitação correspondente à IDF de Lisboa com T = 20 anos	47
Figura 8.2 - Representação gráfica dos valores de atenuação de caudais de ponta em função da rugosidade para cada período de retorno ($i = 1\%$)	48

Figura 8.3 - Efeitos da rugosidade na atenuação do caudal de ponta, para comparação de colectores simples com canais simples (tudo com $i = 5\%$), sujeitos à precipitação correspondente à IDF de Lisboa com $T = 20$ anos	50
Figura 8.4 - Representação gráfica dos valores de atenuação de caudais de ponta em função da rugosidade para cada período de retorno ($i = 5\%$)	51
Figura 8.5 - Efeitos da rugosidade na atenuação do caudal de ponta, para comparação de colectores simples com um sistema misto de canais e colectores (tudo com $i = 1\%$), sujeitos à precipitação correspondente à IDF de Lisboa com $T = 20$ anos	53
Figura 8.6 - Representação gráfica dos valores de atenuação de caudais de ponta em função da rugosidade para cada período de retorno ($i = 1\%$)	54
Figura 8.7 - Efeitos da rugosidade na atenuação do caudal de ponta, para comparação de colectores simples com um sistema misto de canais e colectores (tudo com $i = 5\%$), sujeitos à precipitação correspondente à IDF de Lisboa com $T = 20$ anos	55
Figura 8.8 - Representação gráfica dos valores de atenuação de caudais de ponta em função da rugosidade para cada período de retorno ($i = 1\%$)	56
Figura 8.9 - Caudais no último troço do sistema, para comparação de colectores simples com um sistema misto de canais e colectores (tudo com $i = 1\%$), sujeitos à precipitação correspondente ao hietograma de S. João da Talha de 12/01/2010.....	58
Figura 8.10 - Caudais no último troço do sistema, para comparação de colectores simples com um sistema misto de canais e colectores (tudo com $i = 1\%$), sujeitos à precipitação correspondente ao hietograma de Coimbra a 8/10/2004	60
Figura 8.11 - Caudais no último troço do sistema, para comparação de colectores simples com canais simples e para a duplicação dos sistemas em série (tudo com $i = 5\%$), sujeitos à precipitação correspondente ao hietograma de Coimbra a 8/10/2004	61
Figura 8.12 - Caudais no último troço do sistema, para comparação de colectores simples com um sistema misto de canais e colectores (tudo com $i = 1\%$), sujeitos à precipitação correspondente ao hietograma de Coimbra a 23/10/1999	63
Figura 8.13 - Caudais no último troço do sistema, para comparação de colectores simples com um sistema misto de canais e colectores (tudo com $i = 1\%$), sujeitos à precipitação correspondente ao hietograma de Coimbra a 16/09/2002	65
Figura 8.14 - Caudais no último troço do sistema, para comparação de colectores com canais para a duplicação dos sistemas em paralelo e em série (tudo com $i = 5\%$ e canais com $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$), sujeitos à precipitação correspondente ao hietograma de Coimbra a 16/09/2002.....	66

Figura 8.15 - Perfil dos colectores do sistema misto em situação de ponta, com a respectiva linha piezométrica (para $i = 1\%$ e canais com $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$) sujeitos à IDF de Lisboa $T = 20$ anos 69



Índice de Quadros

Quadro 4-1 - Remoção de contaminantes por pavimentos permeáveis	18
Quadro 4-2 - Remoção de contaminantes por valas revestidas com vegetação	24
Quadro 7-1 - Tempos de concentração dos sistemas mistos e de colectores equivalentes	45
Quadro 7-2 - Tempos de concentração dos sistemas de canais, e de colectores equivalentes	45
Quadro 8-1 - Atenuação da ponta de cheia em canais ($i = 1\%$), como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos às IDF de Lisboa para $T = 2, 20$ e 100 anos	48
Quadro 8-2 - Atenuação da ponta de cheia em canais ($i = 5\%$), como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos às IDF de Lisboa para $T = 2, 20$ e 100 anos	50
Quadro 8-3 - Atenuação da ponta de cheia em sistemas mistos de canais e colectores ($i = 1\%$), como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos às IDF de Lisboa para $T = 2, 20$ e 100 anos	53
Quadro 8-4 - Atenuação da ponta de cheia em sistemas mistos de canais e colectores ($i = 5\%$), como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos às IDF de Lisboa para $T = 2, 20$ e 100 anos	56
Quadro 8-5 - Atenuação da ponta de cheia em sistemas mistos de canais e colectores, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos ao hietograma de S. João da Talha	57
Quadro 8-6 - Atenuação da ponta de cheia em canais, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos ao hietograma de S. João da Talha.....	59
Quadro 8-7 - Atenuação da ponta de cheia em sistemas mistos de canais e colectores, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos ao hietograma de Coimbra a 8/10/2004.....	60
Quadro 8-8 - Atenuação da ponta de cheia em canais, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos ao hietograma de Coimbra a 8/10/2004	61
Quadro 8-9 - Atenuação da ponta de cheia em sistemas mistos de canais e colectores, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos ao hietograma de Coimbra a 23/10/1999.....	62
Quadro 8-10 - Atenuação da ponta de cheia em sistemas mistos de canais e colectores, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos ao hietograma de Coimbra a 16/09/2002.....	64
Quadro 8-11- Atenuação da ponta de cheia em canais, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos ao hietograma de Coimbra a 16/09/2002	65
Quadro 8-12 - Atenuação da ponta de cheia em sistemas mistos de canais e colectores, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos às IDF de Lisboa para $T = 2, 20$ e 100 anos	67
Quadro 8-13 - Aumentos dos tempos de concentração dos sistemas mistos, quando comparados com sistemas de colectores equivalentes.	68

Quadro 8-14 - Aumentos dos tempos de concentração dos sistemas de canais, quando comparados com sistemas de colectores equivalentes.....	70
Quadro 8-15 - Configurações com melhores resultados para aumento da dimensão dos sistemas (canais com $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$) e respectivas percentagens de atenuação de caudais de ponta, comparando com sistema de colectores equivalente	75



1. Introdução

O crescimento das nossas cidades tem vindo, ao longo dos tempos, a levantar problemas de gestão do ciclo hidrológico urbano. Este ciclo hidrológico é muito diferente do natural, em função das alterações do uso do solo, que promove uma crescente impermeabilização com impactos nas várias componentes do balanço hidrológico, nomeadamente na relação entre a infiltração e o escoamento superficial. Esta relação altera-se (quando comparado com o regime natural) passando a haver uma percentagem maior de água que se escoia à superfície devido à grande área de superfícies impermeáveis em meio urbano, o que torna a componente subterrânea do ciclo hidrológico menos importantes nestas condições. A Figura 1.1 mostra a variação da relação entre as componentes do ciclo hidrológico em função da percentagem de impermeabilização do solo.

A remoção da vegetação natural, a par da impermeabilização, leva à ocorrência de outro desvio relativo ao ciclo natural: não só há maiores volumes de escoamento à superfície, como a diminuição da resistência ao escoamento leva a que as velocidades de escoamento sejam maiores (Miguez, Veról, & Carneiro, 2012), diminuindo os tempos de concentração das sub-bacias urbanas, bem como das bacias hidrográficas em que estas se inserem.

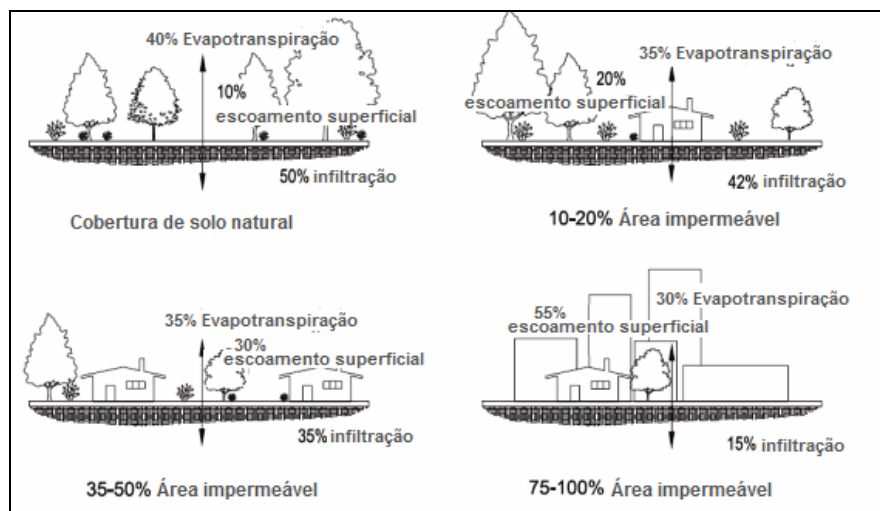


Figura 1.1- Variação relativa das componentes do ciclo hidrológico em função da impermeabilização. Adaptado de: Prince George's County Department of Environmental Resources: Programs and Planning Division, 1999

A drenagem urbana faz-se com três funções principais em mente: a drenagem de águas superficiais, numa perspectiva de protecção contra cheias e alagamentos prolongados; a drenagem de águas residuais por questões de saúde pública; e, mais recentemente, a protecção do ambiente e dos ecossistemas, associada também à prestação de serviços paisagísticos e de amenidade dentro dos próprios meios urbanos (Marsalek et al., 2007).

O crescimento dos meios urbanos que se verificou nas últimas décadas, aponta para a desadequação do actual modelo de gestão do saneamento urbano face às crescentes solicitações (Matos & Frazão, 2001). Actualmente, apesar de, no nosso país, a expansão urbanística ter abrandado, esta não parou, e continuam por resolver alguns dos problemas gerados na fase de rápida expansão que se verificou no passado recente. José Saldanha Matos e António Frazão (Matos & Frazão, 2001) destacam os seguintes aspectos como decorrentes da falta de sustentabilidade da cidade moderna:

- «- degradação dos meios receptores, em especial das linhas de água, das albufeiras e das praias vizinhas;
- ocorrência de inundações;
- riscos directos de comportamento deficiente dos sistemas (com manifestação de odores, criação de ambientes tóxicos ou de poluição com impacto estético - sobrenadantes);
- custos agravados das tarifas, devido às longas distâncias de transporte da água, desde a origem até aos locais de consumo, e dos elevados custos de transporte e tratamento das águas residuais, típico das soluções centralizadoras de “tratamento de fim de linha”.»

Acresce ainda a preocupação levantada pelas perspectivas de alterações climáticas conducentes ao aumento de frequência de eventos extremos (Willems, 2012; Arnbjerg-Nielsen, 2012, apud Zhou, 2014). Neste estudo, e na drenagem urbana em geral, é importante considerar o aumento de frequência dos eventos de precipitação de grande intensidade, visto que os períodos de retorno considerados, em projecto, para áreas urbanas antigas basearam-se em dados do passado, caso os padrões climáticos se alterem o desempenho dos sistemas de drenagem não será o esperado, levando à ocorrência de inundações e a falhas mais frequentes dos sistemas.

Desde há cerca de duas décadas tem vindo a ganhar força, no âmbito da drenagem urbana de águas pluviais, uma abordagem baseada nos princípios da sustentabilidade ambiental (e.g. Princípio da Prevenção, da Precaução, da Equidade, da Solidariedade Inter-geracional, da Subsidiariedade, da Integração, da Cooperação), sendo que o seu desenvolvimento em vários países já passou da esfera da investigação para a da regulamentação (Department of Planning and Local Government, 2009; Iowa Department of Natural Resources, 2010; Woods-Ballard et al., 2007) que obriga, ou promove, o uso de estratégias baseadas em princípios de sustentabilidade no que respeita ao desenvolvimento de novos projectos ou a requalificação de zonas antigas. É com base nestes princípios que este estudo se desenvolve, no sentido de dar um contributo para um melhor conhecimento dos desempenhos de sistemas de drenagem pluvial urbana face à aplicação de técnicas de drenagem urbana sustentável.



2. Objectivos

Dado o desenvolvimento que se tem verificado, em diversos países, de técnicas e práticas de drenagem urbana sustentável, e assumindo que em condições climáticas diferentes não se devem esperar resultados semelhantes, é objectivo deste trabalho fazer uma análise que coloque os pressupostos da drenagem urbana sustentável face ao clima português.

A ocorrência de cheias em meio urbano tem merecido a preocupação de populações e administração, principalmente a nível autárquico, pelo que é importante o apoio que se possa dar para a resolução dos problemas com recurso a soluções de engenharia. A avaliação de soluções alternativas para a gestão das águas pluviais em meio urbano pode ser uma ajuda preciosa no sentido de dar aos gestores novas ferramentas que permitam aliviar a pressão, em termos de eficácia e eficiência, a que os sistemas de drenagem pluvial estão actualmente sujeitos.

Com o presente estudo, pretende-se obter resultados que apontem para a aplicabilidade, ou não, dos princípios da drenagem urbana sustentável, no que toca a aumentos dos tempos de concentração das bacias. Pretende-se avaliar estruturas de drenagem pluvial que proporcionem maiores resistências ao escoamento, comparando-as com estruturas clássicas (colectores) na gestão de eventos extremos de precipitação. Busca-se também quantificar os benefícios esperados na redução de caudais de ponta de cheia face à situação actual. Neste contexto, estabeleceram-se os seguintes objectivos para este trabalho:

- 1 - Fazer uma análise dos efeitos da rugosidade sobre a atenuação das pontas de cheia face a diferentes intensidades de precipitação;
- 2 - estudar o comportamento de estruturas de drenagem urbana conceptuais, que privilegiam a resistência ao escoamento, sujeitas a regimes de precipitação característicos de Portugal, para vários períodos de retorno;
- 3 - avaliar a forma como as configurações das redes de drenagem (maior ou menor grau de ramificação) influenciam a eficiência das atenuações em estudo.



3. Enquadramento Histórico

A drenagem urbana é já muito antiga. Na antiguidade clássica foi posta em prática por romanos e helénicos (Poletto, 2011). No entanto, durante a idade média as práticas de drenagem urbana caíram em desuso e esquecimento. Só após o renascimento, com a redescoberta do classicismo, as práticas de drenagem urbana são reatadas (Miguez & Rezende, 2012).

É de notar que, durante a revolução industrial, o liberalismo político deste período histórico leva a uma diminuição da intervenção estatal em termos de ordenamento urbanístico. Deste modo, o rápido crescimento das cidades, que se expandiram a partir de núcleos desordenados, provocou graves problemas de saúde pública devido à fraca qualidade da gestão sanitária. Foram as grandes epidemias que se verificaram em muitas cidades europeias (e não só) em meados do século XIX que fomentaram o desenvolvimento do moderno sistema de drenagem urbana (nesta fase, unitário) (Poletto, 2011). Para enfrentar o problema da falta de higiene, a solução privilegiada foi a de canalizar e encaminhar para fora da cidade as águas “incómodas” da forma mais rápida possível, mantendo-se esta como a abordagem primordial à gestão da drenagem urbana até há poucas décadas.

Já no século XX, a crescente urbanização verificada levou a que o modelo vigente comesse a dar sinais de não ter capacidade de lidar com os desafios que se lhe colocavam, principalmente no que toca à gestão de cheias urbanas, e no final da década de '70 do século passado começou a buscar-se uma solução integrada para a gestão da água em meio urbano (Miguez & Rezende, 2012).

A visão estabelecida da drenagem urbana baseia-se no pressuposto da remoção, com a maior rapidez possível, das águas incómodas para fora do meio urbano e é antagónica do funcionamento em ciclo, típico dos meios naturais.

A problemática da poluição começa a fazer-se sentir com mais premência em meados do século XX. Em primeira análise, por questões de saúde pública, mas com um crescimento de preocupações ambientais e de conservação ao longo da segunda metade do século.

Neste contexto, surgiu a necessidade de providenciar adequado tratamento às águas residuais domésticas ou industriais, ao passo que as águas pluviais foram consideradas relativamente inócuas para os meios receptores. Assim, é lógico o aparecimento de redes separativas, que encaminham as águas residuais para tratamento em Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), sendo as águas pluviais enviadas directamente para meios receptores naturais, seja o mar (em zonas costeiras) ou rios e ribeiras.

Esta abordagem encontrou problemas, desde logo, pelo facto de muitos dos sistemas de drenagem, cujas águas se pretende tratar, serem de génese antiga e, portanto, do tipo unitário. As ETAR em fim de linha deste tipo de sistemas têm que dar tratamento a um grande volume de água que combina origem pluvial com residual durante a ocorrência de precipitação. Nesta situação, uma de duas coisas pode ocorrer: ou a ETAR é sobredimensionada em função dos caudais de tempo de chuva; ou existe uma sobrecarga do sistema e parte da água vai seguir para o meio receptor sem sofrer tratamento. Ambas as opções têm desvantagens: no primeiro caso, o investimento na construção da ETAR é excessivo e passará boa parte do tempo (especialmente em países com uma estação seca bem definida) subaproveitado; no segundo caso, há grandes quantidades de poluentes não tratados (apesar de muito diluídos) que serão efectivamente lançados nos meios receptores. Para os dois casos existe a agravante adicional de ser difícil estabilizar os processos biológicos de tratamento quando ocorrem grandes variações repentinas de caudal afluente, bem como grandes variações da concentração de matéria orgânica a tratar.

Este cenário mantém-se pouco alterado num contexto de expansão urbana para a periferia dos aglomerados existentes. Isto acontece porque, apesar de os sistemas de drenagem das novas zonas urbanas poderem ser concebidos como separativos, estes devem ser ligados aos sistemas antigos pré-existentes, que muitas vezes não têm alternativas a não ser a ligação aos colectores unitários a jusante, tornando inviável a instalação do sistema separativo. Isto para não referir o problema das ligações indevidas de ramais domésticos a colectores pluviais, ou vice-versa.

Os sistemas separativos bem planeados parecem ser, de facto, a solução para os problemas da drenagem urbana, uma vez que resolvem de forma eficaz as situações acima descritas. Apesar de tudo, ainda carecem de capacidade para gerir outros tipos de problemas entretanto identificados: a poluição difusa; e a ocorrência de cheias em

meio urbano durante os eventos extremos de precipitação (com tendência a aumentar em cenário de alterações climáticas).

Em meios urbanos, os poluentes presentes não são apenas aqueles que vêm das águas residuais domésticas ou industriais. Há uma grande quantidade de poeiras que se deposita sobre as superfícies expostas, onde existem contaminantes de vários tipos (as partículas provenientes dos motores de combustão, que se depositam sobre os arruamentos, são um exemplo). A acrescer a este tipo de deposição seca de poluentes atmosféricos, há a acrescentar a deposição húmida, que ocorre quando, em situações de precipitação, a água “lava” a atmosfera dos seus poluentes, sendo que a própria chuva é um veículo de contaminação.

Em situações de chuva, principalmente nas primeiras chuvadas após um período de tempo seco, as partículas que se depositaram sobre as superfícies, dos telhados e arruamentos, são arrastadas pelo escoamento superficial, fazendo com que nos colectores pluviais haja uma considerável carga de contaminantes a necessitar tratamento. A descarga destes caudais nas linhas de água naturais não é uma solução adequada à protecção, quer do ambiente, quer da saúde pública.

Já relativamente à ocorrência de cheias urbanas, o problema prende-se com a expansão urbana para a periferia de zonas mais antigas, em que os colectores (separativos ou unitários) foram dimensionados para a drenagem dessa zona urbana, considerando que de montante viriam os caudais de áreas não urbanizadas, com maior capacidade de infiltração, maior resistência ao escoamento superficial e maior capacidade de armazenamento (devido à intercepção pela vegetação e pela cobertura do solo). Quando se ligam os colectores pluviais de uma nova zona urbana à rede pré-existente, está-se a criar uma sobrecarga de caudais de ponta para a qual não foi projectada, criando situações de cheias urbanas de curta duração associadas aos eventos extremos de precipitação.

A abordagem típica à gestão de águas pluviais em meio urbano é fortemente centralizada, ou seja, privilegia-se um sistema de drenagem, que recolhe toda a água da superfície e lhe dá uma solução única (centralizada), a descarga em meio receptor adequado, tipicamente um curso de água natural.

Para contrariar a tendência de ocorrência dos problemas já referidos (poluição difusa e cheias urbanas) têm vindo a propor-se soluções descentralizadas (Schuetze & Chelleri, 2013) para a gestão das águas pluviais em meio urbano, sendo que a principal diferença desta abordagem é a tentativa de dar diversas soluções aos problemas, quer dos contaminantes presentes no escoamento superficial, quer dos próprios volumes de escoamento gerados, o mais próximo possível do local em que a precipitação ocorre. Estas técnicas de controlo na origem privilegiam o recurso à infiltração, a fixação de contaminantes pela vegetação, a retenção do escoamento em pequenas estruturas distribuídas pela bacia hidrográfica e outras abordagens que aproximam o comportamento da água em meio urbano ao ciclo hidrológico natural.

4. Drenagem Urbana Sustentável

O conceito de sustentabilidade prevê que o desenvolvimento actual não ponha em risco a satisfação das necessidades futuras, assim, leva em conta uma solidariedade inter-geracional para com os nossos descendentes (United Nations, 1987).

A sustentabilidade aplicada à drenagem urbana leva a três objectivos principais (Woods-Ballard et al., 2007): minimizar os impactes do desenvolvimento sobre a quantidade do recurso água (seja por excesso ou por defeito); minimizar os impactes sobre a qualidade da água; e proporcionar uma melhoria das condições ambientais e da amenidade dos meios urbanos.

4.1 *Sistemas Centralizados vs. Sistemas Descentralizados*

A gestão de águas pluviais e residuais baseada na recolha, transporte e tratamento centralizados dos caudais, apesar de muito eficaz, também tem grandes desvantagens, nomeadamente o uso ineficiente dos recursos hídricos, a degradação ambiental e o aumento dos custos em infra-estruturas e manutenção (Coombes & Paskin, 2003).

Sendo a abordagem actual da gestão da água em meio urbano tendencialmente centralizada, ou seja, a drenagem, tal como o abastecimento, dependem de entidades que gerem grandes áreas através de extensas redes de abastecimento e colectores, cria-se um grande desfasamento em relação aos ciclos naturais, de menor escala, em que a água circula no compartimento terrestre do ciclo hidrológico de forma mais lenta, dando tempo a que os ciclos de nutrientes associados interajam com o solo e as massas de água, localmente, bem como com os factores bióticos neles presentes.

Do ponto de vista da sustentabilidade, a razoabilidade dos sistemas centralizados não é unânime, visto que é difícil reciclar e recuperar a água, os nutrientes e a energia contidos nos efluentes gerados. Nesta linha de raciocínio, começa a ter cada vez mais força a defesa de um modelo de gestão descentralizado, mais próximo dos padrões naturais, buscando soluções com uma “pegada” mais leve (Hao, 2010).

Também no caso da prevenção de inundações urbanas esta questão se faz sentir. Em primeiro lugar, a drenagem rápida das águas pluviais para jusante é a forma mais eficaz de evitar cheias no local, mas, caso haja zonas a jusante com risco de cheia, esta solução tende a piorar a situação (transfere o problema para outra área). Por outro lado, à medida que as zonas urbanas se vão expandindo, normalmente localizam-se cada vez mais longe da massa de água receptora (o mar, em zonas litorais, ou um rio importante), pelo que a eficiência da drenagem rápida para jusante vai diminuindo com o crescimento dos centros populacionais. A qualidade da água é outro factor importante a considerar, visto que nas zonas urbanas há muitos resíduos que se acumulam nas superfícies expostas à chuva e que são arrastados pelas águas pluviais e conduzidos aos meios receptores, sejam rios ou águas subterrâneas, sem qualquer tratamento. A água subterrânea, uma vez poluída, é extremamente difícil de tratar.

O ciclo hidrológico urbano é cada vez mais diverso do natural. Com a impermeabilização crescente, o escoamento superficial é muito mais significativo do que em ambientes naturais e a infiltração e recarga de aquíferos é muito menor. Isto leva a que os tempos de concentração das bacias urbanas sejam menores, o que potencia a ocorrência de inundações. Também os escoamentos de base dos cursos de água são afectados, visto que dependem da alimentação pelo escoamento sub-superficial, diminuindo a disponibilidade do recurso água, não só subterrânea como também superficial (Woods-Ballard et al., 2007).

4.2 Drenagem Urbana Sustentável no mundo

Em diferentes países fala-se da sustentabilidade associada à drenagem urbana com recurso a diferentes terminologias. De seguida apresentam-se vários exemplos de abordagens aplicadas a este tema:

- No Reino Unido, sob o título de *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS) estão abrangidas as técnicas de controlo na origem, mas também a sua inserção numa cadeia de gestão (*management train*) que inclui igualmente o controlo a nível local e a nível regional. A Figura 4.1 mostra esquematicamente o funcionamento do princípio de cadeia de gestão. Na cadeia de gestão pretende-se que a água sofra tratamento/gestão a cada passo antes de ser encaminhada para o nível seguinte.

Assim, pode fazer-se tratamento e retenção ao nível do edifício individual, sendo a água encaminhada de seguida para uma estrutura que realize tratamento e retenção ou infiltração ao nível do arruamento, seguindo para uma estrutura dimensionada para servir o bairro, e assim sucessivamente, até à descarga em meio receptor.

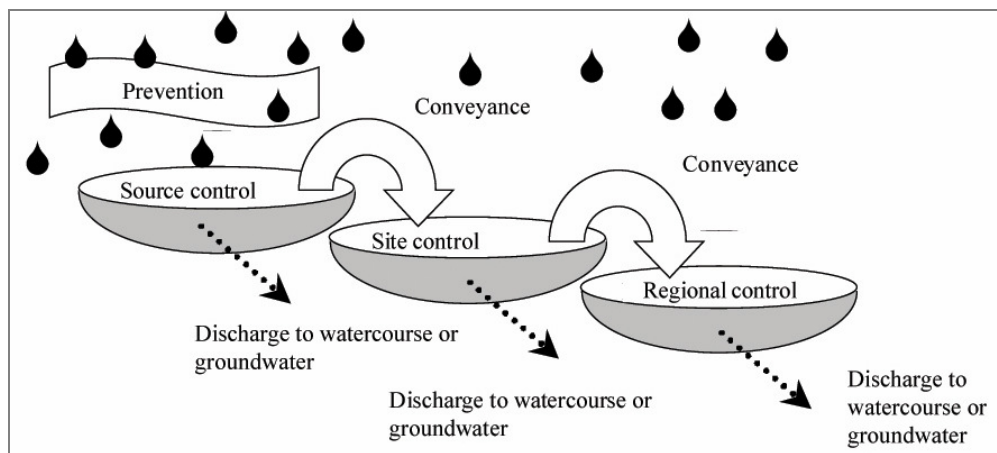


Figura 4.1 – Cadeia de gestão na drenagem sustentável
Adaptado de www.cloudburst.ie

Há também a preocupação com a sustentabilidade no espaço e no tempo, vertida para a regulamentação nacional e regional, sendo que o melhor exemplo disto é a obrigatoriedade de uma nova zona urbana respeitar os caudais de ponta de cheia que descarregava no sistema de drenagem existente antes de ser urbanizada (*greenfield runoff*), garantindo que não afecta o desempenho das redes de drenagem pré-existentes às quais se vai ligar.

- Nos Estados Unidos, o conceito das melhores práticas de gestão (*Best Management Practices* – BMP) foi adaptado da gestão de riscos de poluição industrial para ser aplicado à sustentabilidade em drenagem urbana, com sucesso (Miguez, Veról, & Carneiro, 2012). Estas práticas dividem-se em estruturais e não estruturais, sendo as primeiras essencialmente técnicas de controlo construídas na origem, como sejam trincheiras de infiltração ou filtros biológicos, enquanto as não estruturais incluem práticas comportamentais, como sejam manuais de manutenção de zonas urbanas ou limitações aos usos do solo.

Também nos Estados Unidos, surge o conceito de desenvolvimento de baixo impacto (*Low Impact Development* – LID) (Prince George's County Department of Environmental Resources: Programs and Planning Division, 1999b), que se caracteriza por constituir um processo de concepção e projecto de zonas urbanas que tenta replicar o ciclo hidrológico natural, minimizando as áreas impermeáveis para promover a infiltração e maximizando zonas verdes para retenção de poluição difusa. Procura também manter os tempos de concentração das bacias próximos dos do estado natural e utiliza retenção para controlar os caudais de ponta.

- Na Austrália o termo utilizado para a drenagem urbana sustentável é *Water Sensitive Urban Design* – WSUD (concepção urbana sensível à água), que introduz o paradigma de gestão integrada do ciclo hidrológico urbano. O objectivo é combinar as engenharias com as ciências ambientais em todos os serviços relacionados com a água (e.g. abastecimento, drenagem tratamento), considerando que a preservação de ambientes aquáticos naturais em meio urbano também é um serviço a prestar (Wong, 2006). O principal tema a reter deste conceito é a integração da gestão da água, tanto a nível de diferentes escalas espaciais, como na interdisciplinaridade das áreas de conhecimento envolvidas para criar valor acrescentado ao ambiente urbano (Miguez et al., 2012).

- Em Portugal, a comunidade científica acompanha os desenvolvimentos internacionais, no entanto a informação ainda não está disseminada à maioria dos escritórios projectistas e administrações autárquicas. Há alguns exemplos de implementação de práticas de drenagem sustentável em zonas urbanas, como foi feito no caso de novas urbanizações em Tróia, mas fala-se maioritariamente de bacias de retenção e pavimentos permeáveis. Já fora dos aglomerados urbanos, tem-se feito trabalho na aplicação ao tratamento de escorrências de grandes eixos viários.

4.3 Técnicas de Controlo na Origem

Ao implementar medidas estruturais de controlo na origem, no âmbito da drenagem urbana, pretende-se melhorar o desempenho dos sistemas num, ou mais, dos três objectivos principais da drenagem urbana sustentável: quantidade; e/ou qualidade da água pluvial drenada; e amenidades ambientais.

Segue-se uma descrição de várias soluções de drenagem urbana sustentável reconhecidas internacionalmente (Department of Planning and Local Government, 2009; Iowa Department of Natural Resources, 2010; León, Gutiérrez, & Salazar, 2011; Prince George's County Department of Environmental Resources: Programs and Planning Division, 1999a; SEMCOG: Southeast Michigan Council of Governments, 2008; Woods-Ballard et al., 2007).

Bio-retenção

As áreas de bio-retenção, também são conhecidas como jardins de chuva (rain gardens), ou filtros de bio-retenção. O seu objectivo principal é a remoção de poluição difusa presente nos escoamentos superficiais de eventos de precipitação com tempos de retorno muito curtos (precipitações frequentes), sendo os caudais excedentes à capacidade da estrutura, associados a eventos extremos, encaminhados para o sistema de drenagem pluvial a jusante. A Figura 4.2 mostra uma área de bio-retenção inserida num parque de estacionamento em zona urbana.



Figura 4.2 - Área de bio-retenção associada a estacionamento
Adaptado de: <http://chesapeakestormwater.net>

As áreas de bio-retenção são sistemas de solo e vegetação que funcionam como filtros para o escoamento superficial encaminhado para elas, removendo os poluentes através de uma variedade de processos físicos, biológicos e químicos.

Estas estruturas são normalmente constituídas por uma faixa relvada de regularização do caudal de entrada, uma base de areia, uma área para alagamento, solo com uma camada superior de material orgânico e plantas.

A velocidade do escoamento à entrada é reduzida ao passar pela faixa de regularização e, de seguida, a água é distribuída uniformemente ao longo da área de alagamento. A saída da água faz-se para o solo subjacente à estrutura ao longo de dois ou três dias. Este volume de água retido na estrutura contribui para a atenuação dos caudais afluentes ao sistema de drenagem pluvial, embora não seja esta a principal função das estruturas de bio-retenção.

A eficiência de remoção de sólidos suspensos foi avaliada no terreno por Liqing Li e Allen Davis (Liqing & Davis, 2014) em cerca de 95%, ao passo que a remoção de azoto depende da forma em que este se apresenta, havendo boas reduções de todas as formas à excepção dos nitratos e do azoto orgânico dissolvido.

Faixas filtrantes

Também conhecidas como faixas relvadas de regularização (*grassed buffer strips*, *vegetated filter strips*, *filter strips*, *grassed filters*), são aplicadas como estruturas de remoção de poluentes na transição entre superfícies diferentes (e.g. arruamento para linha de água). Actuam como filtros para a retenção de contaminantes presentes nas escoências pluviais, visto que a redução de velocidades de escoamento permite a deposição de partículas e a adsorção de moléculas pelos caules das plantas que recobrem a faixa filtrante. Sendo áreas permeáveis, têm a capacidade de promover alguma infiltração.

Na Figura 4.3 pode ver-se a faixa filtrante do lado esquerdo, que recebe o escoamento superficial do estacionamento, conduzindo-o à estrutura de infiltração ao centro.

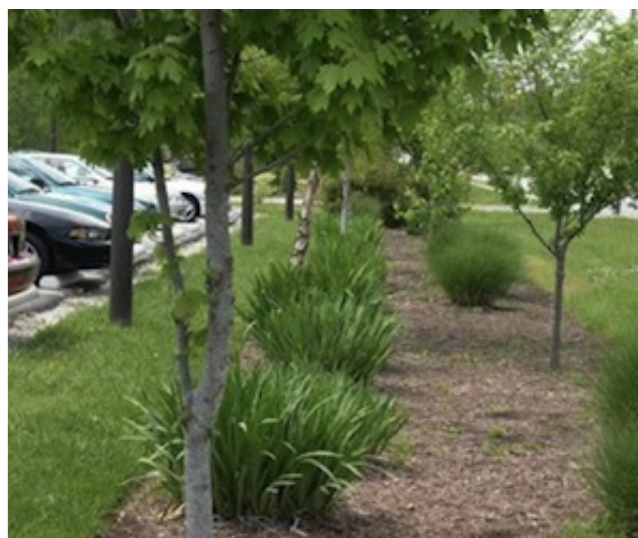


Figura 4.3 - Faixa filtrante entre estacionamento e trincheira de infiltração
Adaptado de: American Rivers; <http://www.americanrivers.org>

Pavimentos permeáveis

Os pavimentos permeáveis são usados para promover a infiltração e, dessa forma, reduzir os volumes de água a escoar pelo sistema de drenagem. Consistem em superfícies porosas sobre uma camada de armazenamento composta, normalmente por material grosseiro com uma grande razão de vazios. Devem ser instalados sobre solos com boa capacidade de infiltração e pouco compactados. A Figura 4.4 apresenta um pavimento permeável em fase de instalação.



Figura 4.4 - Pavimento permeável sobre camada de gravilha
Adaptado de: <http://www.greatnorthlandscape.com>

Não se espera que estas estruturas tenham capacidade de infiltrar toda a precipitação de eventos extremos, pelo que devem ter um sistema de drenagem associado para encaminhar os caudais em excesso.

Para além da função primária de infiltração (redução de volumes a escoar), os pavimentos permeáveis também têm impacto na melhoria da qualidade da água, dado que a percolação através do pavimento e o tempo de retenção na camada subjacente dão oportunidade para que ocorram processos de filtração e deposição de contaminantes. No entanto, estes mesmos processos de filtração vão levando à colmatção do meio poroso, pelo que tem que se prever a sua substituição ou manutenção a intervalos regulares.

Segundo o *Water Sensitive Urban Design Technical Manual for the Greater Adelaide Region*, são expectáveis as percentagens de remoção apresentadas no Quadro 4-1:

Quadro 4-1 - Remoção de contaminantes por pavimentos permeáveis

Sedimentos grosseiros	Sedimentos médios	Sedimentos finos	Óleos e gorduras	Azoto total	Fósforo total	Metais
50 – 80%	30 – 50%	30 – 50%	10 – 50%	40 – 80%	50 – 80%	10 – 50%

Estruturas de infiltração

Para promover a infiltração da água precipitada, em condições favoráveis de capacidade de infiltração do solo, utilizam-se diversos tipos de estruturas, nomeadamente:

- Poços de infiltração - concebidos para infiltrar o escoamento de pequenas áreas, normalmente edifícios individuais; são constituídos por poços escavados e preenchidos com material grosseiro, normalmente calhaus, com uma razão de vazios muito elevada. Estas estruturas retêm temporariamente a água e promovem a infiltração gradual.
- Bacias de infiltração - são utilizadas para receber escoamento de áreas maiores do que os poços de infiltração, funcionando como bacias de retenção que, por estarem localizadas sobre solos com boa capacidade de infiltração, são concebidas para fazer infiltrar a água retida ao longo de um período de alguns dias (normalmente, não mais de quatro dias, para evitar a proliferação de mosquitos).
- Trincheiras de infiltração – são estruturas lineares semelhantes, na sua constituição escavada e preenchimento com material grosseiro, aos poços de infiltração. A diferença é que estas, para além de promoverem a infiltração, também fazem o transporte da água para fase seguinte da cadeia de gestão de drenagem (seja ela qual for). Ao fazer-se o escoamento num meio que oferece grande resistência ao escoamento, aumenta-se o tempo de concentração da bacia, contribuindo também, dessa forma, para a redução das pontas de cheia.
- Retenção/infiltração sub-superficial – é feita recorrendo à construção de uma estrutura de retenção de água, que é preenchida com calhaus ou estruturas modulares ocas, sob superfícies sujeitas a cargas ligeiras (jardins ou campos de jogos). Sendo o solo subjacente apto à promoção de infiltração, esta pode fazer-se numa área considerável, sendo esta técnica capaz de tratar água proveniente de áreas comparáveis às que são tratadas em bacias de infiltração.

Telhados verdes

Essencialmente, trata-se de fazer crescer vegetação em cima das coberturas dos edifícios. São sistemas em várias camadas, sendo que o objectivo das camadas inferiores é proteger o telhado, e que as camadas superiores funcionam como substituto do substrato natural, permitindo a retenção da precipitação e servindo de substrato para o crescimento das plantas. Dependendo da profundidade do meio de cultivo utilizado, da necessidade de manutenção e da capacidade de retenção da estrutura, fala-se de telhados verdes intensivos (maior profundidade, desempenho e custos de manutenção) ou extensivos. A Figura 4.5 mostra a aplicação de telhados verdes, do tipo extensivo, a um complexo de edifícios.



Figura 4.5 - Telhado verde extensivo
Adaptado de: <http://www.time-tolose.com>

Sistemas de Aproveitamento de Águas Pluviais – Colheita de Chuva

A água da chuva tem, normalmente, uma qualidade boa para alguns usos domésticos ou industriais. Não sendo potável, no sentido de garantir os padrões de qualidade legalmente requeridos, é suficientemente boa para ser utilizada em descargas de autoclismos, lavagem de roupa ou rega de jardins.

Os Sistemas de Aproveitamento de Águas Pluviais (SAAP) são constituídos por reservatórios, tanques ou cisternas que recebem as águas pluviais provenientes dos telhados dos edifícios, através dos tubos de queda que vêm dos algerozes. Estes têm que ser equipados com grelhas que impeçam a entrada no sistema de materiais que se tenham acumulado no telhado e subsequentemente sido arrastados pela chuva. É também comum possuírem um dispositivo que rejeita os primeiros litros provenientes de cada chuvada, por serem os que transportam maior carga de sólidos suspensos ou outros contaminantes. Na Figura 4.6 pode ver-se um tipo de grelha utilizada para remover materiais grosseiros antes de encaminhar a água para o reservatório.



Figura 4.6 - Grelha de remoção de detritos grosseiros em SAAP
Adaptado de: <http://www.homepower.com>

Fazer a colheita de chuva (*rainwater harvesting*) tem como principal função a preservação do recurso água; no entanto, alguns autores sugerem que pode contribuir para a atenuação de picos de cheia, desde que seja deixado um quarto a um terço do reservatório/cisterna vazio para poder reter esse volume em caso de precipitações intensas. Isto consegue-se com um orifício de descarga controlada a dois terços da altura da base, que esvazia o reservatório lentamente após a ocorrência do evento de

precipitação. Pode ver-se na Figura 4.7 o esquema de uma cisterna de águas pluviais preparada para contribuir no amortecimento de precipitações intensas.

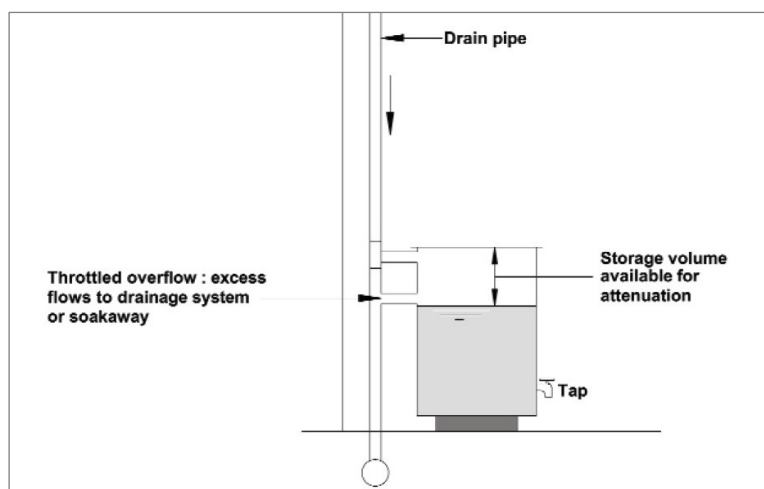


Figura 4.7 - Esquema de cisterna de jardim com volume reservado a atenuação
Adaptado de: The SUDS Manual

Bacias de retenção

Também referidas como bacias de detenção, são constituídas por depressões (naturais ou escavadas) que permitem o armazenamento temporário de água da chuva, para evitar cheias a jusante. Apesar de terem como principal objectivo a atenuação de picos de cheia, também proporcionam algum impacto na melhoria da qualidade da água, devido à sedimentação associada às baixas velocidades de escoamento neste tipo de estrutura.

A principal sistematização que se pode fazer para este tipo de estruturas reside no facto de terem, ou não, um corpo de água permanente, falando-se então de bacias de retenção de água permanente ou secas. A principal diferença de desempenho entre os dois tipos é referente ao tratamento de contaminantes, sendo as bacias secas concebidas para atenuação de caudais de ponta, com capacidade de tratamento residual, ao passo que a presença de um corpo de água permanente permite a ocorrência de processos biológicos de tratamento da água que podem proporcionar boas eficiências de remoção de contaminantes. Tipicamente as bacias de retenção secas têm maior capacidade do que as com corpo de água permanente, até porque o volume ocupado pela água em permanência não é aproveitado para efeitos de atenuação de caudais.

Valas revestidas com vegetação

São estruturas lineares de escoamento de caudais, alternativas às valetas ou aos colectores, constituídas por canais em terra cobertos de vegetação, normalmente relva, que podem ter associada uma sub-camada de material grosseiro que funcione como trincheira de infiltração.

A secção transversal típica é larga e baixa, promovendo maior resistência ao escoamento devido à presença das plantas e ao grande raio hidráulico. Para alturas de escoamento até 10 cm a rugosidade é entre $K = 5 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ e $K = 10 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ (Center for Watershed Protection, 2012). Esta redução das velocidades de escoamento, para além de contribuir para atenuar as pontas de cheia, também cria condições para a deposição de sedimentos (controlando a qualidade da água) e promove a infiltração (reduzindo os volumes a escoar). A Figura 4.8 mostra uma vala revestida com vegetação encaminhando o escoamento ao longo dum arruamento.



Figura 4.8 - Vala revestida com vegetação para transporte de caudais em tempo de chuva
Adaptado de: <http://sudsnet.abertay.ac.uk>

As principais vantagens de utilizar valas revestidas com vegetação em vez dos sistemas convencionais (valetas ou colectores) são:

- Removem sedimentos médios a grosseiros (e os contaminantes que lhes estejam associados) por deposição e filtração pelos caules da vegetação presente;
- Reduzem os volumes de escoamento pela promoção de alguma infiltração (desde que o solo subjacente seja adequado);
- Atrasam as pontas de cheia, pela acção de diminuição das velocidades de escoamento;
- Permitem a circulação de peões em tempo seco;
- Proporcionam um pré-tratamento das águas pluviais antes da entrada nas estruturas a jusante na cadeia de gestão.

Para funcionarem correctamente, as valas revestidas com vegetação devem ser construídas com inclinações entre 1% e 5%, sendo que para as inclinações maiores deve prever-se a instalação de barreiras ao escoamento a intervalos regulares (em betão, madeira ou pedras).

Para potenciar a capacidade de tratamento de contaminantes pode prever-se manter em permanência água no fundo da vala, para que os processos biológicos se processem com maior eficiência, conseguindo-se nestes casos boas percentagens de remoção de contaminantes.

Segundo o *Water Sensitive Urban Design Technical Manual for the Greater Adelaide Region*, são expectáveis as percentagens de remoção apresentadas no Quadro 4-2:

Quadro 4-2 - Remoção de contaminantes por valas revestidas com vegetação

Sedimentos grosseiros	Sedimentos médios	Sedimentos finos	Óleos e gorduras	Nutrientes	Metais
50 – 80%	30 – 50%	10 – 50%	10 – 50%	10 – 50%	10 – 50%

Por serem estruturas lineares, apesar de ocuparem bastante área, conseguem ser aplicadas em requalificação de áreas densamente urbanizadas, nas quais não se poderia aplicar, por exemplo, uma bacia de retenção. Na Figura 4.9 pode ver-se um exemplo de aplicação de valas revestidas com vegetação a uma zona fortemente urbanizada.



Figura 4.9 - Vala revestida com vegetação em zona urbana consolidada
Adaptado de: <http://muralmouth.wordpress.com>



5. Base de Estudo – Bacia urbana de Sacavém

Tendo este estudo sido desenvolvido com a colaboração dos Serviços Municipalizados de Água e Saneamento de Loures, a bacia hidrográfica que foi escolhida para servir de base à reflexão sobre a aplicabilidade prática da drenagem urbana sustentável, em contexto de reabilitação de sistemas de drenagem pluvial, face às condições climáticas portuguesas, foi a bacia de Sacavém.

Esta área urbana, de génese antiga, sofre regularmente com episódios de cheias urbanas na sua zona baixa, pela conjugação dos factos de drenar uma área muito vasta e de se encontrar condicionada na sua capacidade de descarga de caudais na linha de água pelo nível de maré no Rio Trancão.

A bacia hidrográfica que drena para a baixa de Sacavém tem uma área aproximada de 200 ha, com quase 3 km de comprimento por 900 m de largura média, sendo principalmente constituída por zonas urbanas consolidadas (residenciais ou industriais), intercaladas com algumas áreas rurais ou terrenos expectantes. A bacia inclui também uma parte da pista do aeroporto de Lisboa e um pequeno troço da A1. Pode ver-se na Figura 5.1 a delimitação da bacia sobre o mapa da zona de Sacavém.



Figura 5.1 - Delimitação da bacia de Sacavém



6. Metodologia

A hipótese de partida, na abordagem ao problema das cheias urbanas, era de que a aplicação de técnicas de drenagem urbana sustentável teria um impacto positivo apreciável na redução de caudais de ponta de cheia para eventos de grande intensidade. A principal forma de atenuação de caudais de ponta sobre a qual este estudo se debruça é a resistência ao escoamento, no sentido de aumentar os tempos de concentração das sub-bacias de cabeceira.

Optou-se por ignorar os efeitos positivos, que muitas estruturas de controlo na origem conseguem, de fazer infiltrar parte da água que precipita no sentido de uma redução efectiva dos volumes escoados.

Esta opção foi tomada por dois motivos. Em primeiro lugar, por já ter sido levantada a dúvida, por profissionais da área de projecto, quanto à capacidade da infiltração ter impacto real na redução dos caudais de ponta “que interessam” (os de eventos extremos) em situações de saturação do solo. Essas situações são expectáveis quando temos períodos de precipitação, mais ou menos contínua, a anteceder os grandes picos de chuva. Considerou-se que a questão da comparação dos efeitos da infiltração face aos hietogramas típicos do clima português mereceria um estudo independente deste.

O segundo motivo, relacionado com o primeiro, prende-se com o facto de a capacidade de infiltração variar com diversos factores, que vão desde as características geológicas do terreno ao grau de compactação, tornando uma solução para os caudais de ponta baseada nestes fenómenos, uma técnica condicional e aplicável apenas em casos de solos favoráveis, perdendo-se o potencial de aplicação generalizada.

Em suma, assumiu-se que estudar os efeitos da resistência ao escoamento, independentemente de outros efeitos positivos que as soluções propostas pudessem ter, seria uma boa forma de contribuir para a aceitação mais alargada das técnicas de controlo na origem de uma forma relativamente conservativa. Se houver impactos positivos da resistência aos escoamentos por si só, todos os restantes benefícios serão uma mais-valia, por pequenos ou difíceis de quantificar que se revelem.

Por motivos semelhantes, acrescido do desinteresse público e político pelo problema, a questão da poluição difusa das escorrências pluviais e o seu tratamento através de técnicas de controlo na origem, foi também ignorado.

Considerando que se pretendia aumentar o tempo de concentração da bacia, conjugado com o princípio do controlo na origem, ou seja, o mais próximo possível do local da precipitação, procurou-se olhar para uma sub-bacia que fosse uma cabeceira do sistema, mas que não fosse demasiado afastada da zona em risco de cheias para que os atrasos ao escoamento que fossem conseguidos não se diluíssem num longo percurso hidráulico, ou seja, ganhar 5 minutos de atraso na ponta faz pouca diferença se esta demorar 30 minutos a chegar à zona de cheia (nesse caso talvez fosse mais adequado considerar uma, ou várias, bacias de retenção).

Escolheu-se fazer a análise de uma solução que se adaptasse ao bairro dos Terraços da Ponte, em Sacavém de Cima, mas que fosse facilmente aplicável a outras zonas urbanas, especialmente em contexto de reabilitação de zonas urbanas consolidadas. A Figura 6.1 mostra um arruamento típico do bairro dos Terraços da Ponte.



Figura 6.1 - Arruamento no bairro dos Terraços da Ponte

Levando em consideração a adaptabilidade da solução proposta a qualquer zona urbana cujos caudais de ponta se pretenda controlar, optou-se por testar as potencialidades de uma combinação do conceito de pavimento permeável com o de vala revestida com vegetação, considerando que a aplicação de pavimento permeável em zonas urbanas não afecta o modo de vida dos residentes, o que não aconteceria caso se ocupasse parte da área de passeio com uma vala revestida com vegetação. A função de condução de caudais poderia ser feita em canal lateral ao arruamento, usando os 2,5m normalmente reservados ao estacionamento, com altura máxima de escoamento de 10 cm (desviando para colectores toda a água em excesso), tendo como objectivos minimizar o desnível a vencer pelas viaturas e o possível incómodo aos utilizadores e maximizar o raio hidráulico e, portanto, a resistência ao escoamento. Tendo na categoria dos pavimentos permeáveis a opção de grelhas de enrelvamento em betão, considerou-se que a resistência ao escoamento, de aproximadamente $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ (Interlocking Concrete Pavement Institute, 2006), poderia ser suficiente para a atenuação das pontas de cheia, permitindo também os benefícios adicionais de melhoria da qualidade da água expectáveis, quer dos pavimentos permeáveis, quer das valas revestidas com vegetação. Na Figura 6.2 pode ver-se o aspecto das grelhas de enrelvamento em betão aplicadas a um parque de estacionamento.



Figura 6.2 - Grelhas de enrelvamento em betão
Adaptado de: <http://www.archiproducts.com>

6.1 Modelos

Para testar a validade da hipótese apresentada, de que o aumento da resistência ao escoamento, proporcionado por aplicação de técnicas de drenagem urbana sustentável, seria capaz de produzir efeitos apreciáveis sobre os picos de cheia associados a eventos extremos de precipitação, foram montados dois cenários de simulação simples, usando o software de distribuição livre da *US Environment Protection Agency*, o *Storm Water Management Model* (SWMM 5.1).

O primeiro cenário é uma simplificação extrema do problema. É constituído por duas bacias iguais, de 500 m², de forma quadrada, inclinação de 5% e totalmente impermeáveis, que pretendem representar telhados. Cada bacia drena o hidrograma gerado, em função do hietograma introduzido como dado do problema, num sistema de drenagem diferente mas comparável. Uma delas drena para um colector de 300mm, com K de 77m^{1/3} s⁻¹ (n=0,013), ao passo que a outra drena para um canal de secção parabólica baixa, com 10 cm de altura máxima para uma largura máxima de 2,5 m, com uma rugosidade de 40m^{1/3} s⁻¹ (n=0,025). Todas as restantes características foram mantidas iguais para os dois casos.

O segundo cenário faz uma maior aproximação a uma solução aplicável à realidade. É constituído por quatro bacias de 600 m², que replicam edifícios dos Terraços da Ponte e a área de passeio adjacente, e o respectivo sistema de drenagem.

Para fazer a comparação entre a drenagem em colector simples com a drenagem em sistema misto, a disposição das bacias foi duplicada, com quatro a drenar para um colector de 300 mm, comparadas com outras quatro a drenar para canais que só transferem para colector os volumes que não conseguem transferir para o canal seguinte por uma passagem hidráulica de 200mm de diâmetro.

Características dos modelos

- Modelo simplificado canal vs. colector (Figura 6.3).

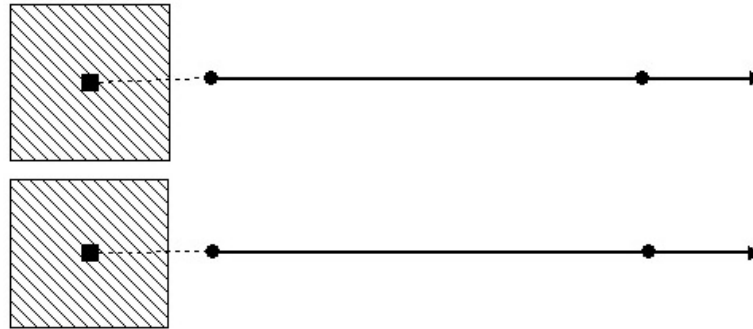


Figura 6.3 - Esquema do modelo simplificado – gerado em SWMM 5

Bacias (iguais):

- Área: 500 m²
- Inclinação: 0,5 %
- 100 % impermeável

Sistema de drenagem em colector:

- Profundidade das caixas de visita: 1,4 m
- Diâmetro dos colectores: 300 mm
- Inclinação dos colectores: 5%
- Rugosidade dos colectores: $K = 77 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$
- Comprimentos:
 - 1º troço: 60 m
 - 2º troço: 10 m

Sistema de drenagem em canal:

- Profundidade das caixas: 10 cm
- Largura dos canais: 2,5 m
- Profundidade máxima dos canais: 10 cm
- Inclinação dos canais: 5%
- Rugosidade dos canais: $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$
- Comprimentos:
 - 1º troço: 60 m
 - 2º troço: 10 m

➤ Modelo de arruamento simples - colectores vs. canais.

Neste caso, a comparar ao modelo convencional (dois edifícios a descarregar numa caixa, mais dois a descarregar na caixa seguinte), construiu-se um modelo em que a caixa de águas pluviais de cada edifício descarrega no início de um canal de secção parabólica, com 10 cm de profundidade e 2,5 m de largura, revestido de grelhas de enrolamento em betão. Cada um destes canais, situados em ambos os lados do arruamento, é rebaixado em relação à faixa de rodagem e ao passeio, para deles receber escoamento (embora este escoamento tenha sido desprezado por simplificação – em SWMM a entrada de água na rede de drenagem só se faz nos nós). Considerou-se que os canais seriam utilizados para estacionamento longitudinal, dadas as características do seu perfil e do seu revestimento.

Na Figura 6.4 pode ver-se um esquema, em perspectiva, do posicionamento do canal entre o passeio (à esquerda) e a faixa de rodagem (à direita). Já na Figura 6.5 pode observar-se a configuração, em planta, dos dois cenários de simulação, com o esquema da esquerda mostrando a configuração convencional de drenagem para colector e o esquema da direita mostrando o posicionamento dos canais entre o passeio e a faixa de rodagem.

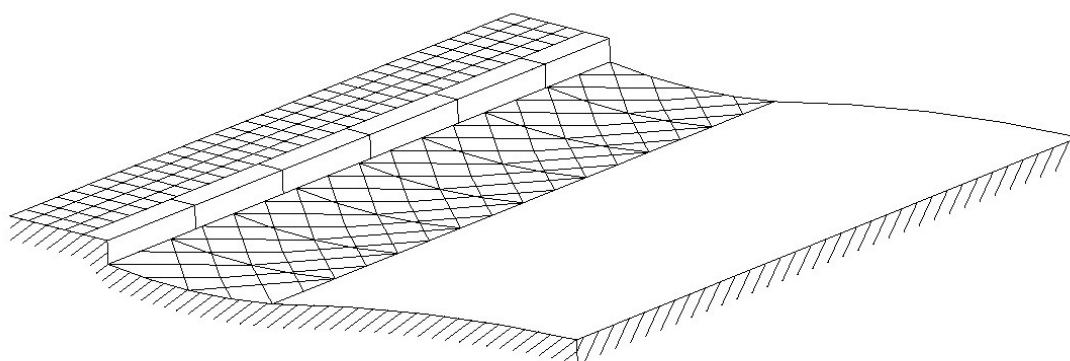


Figura 6.4 - Esquema em perspectiva do canal

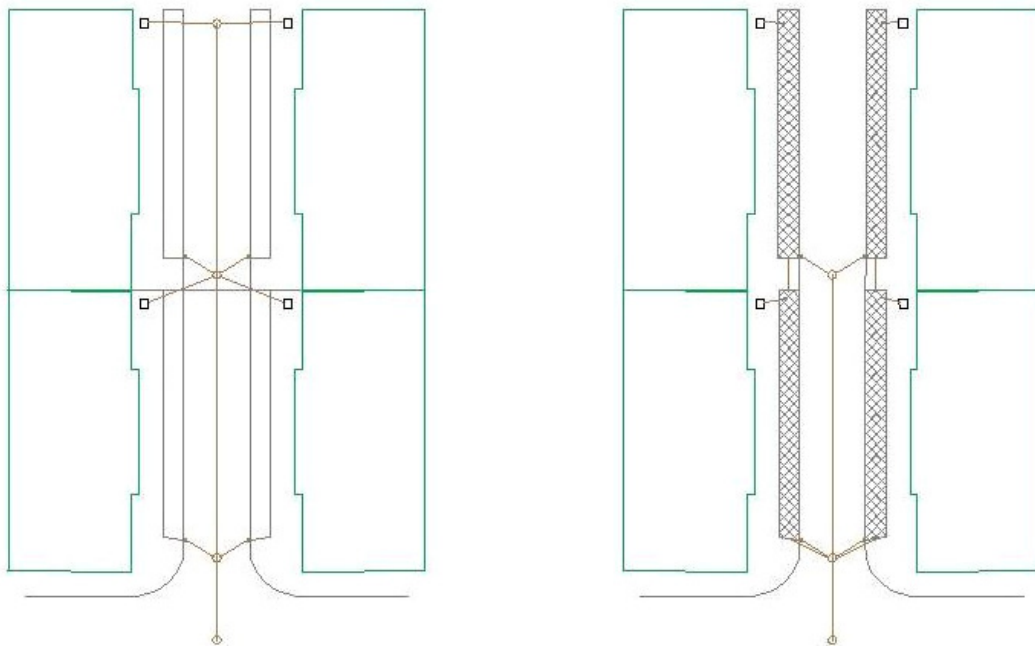


Figura 6.5 - Esquema comparativo do arruamento com drenagem convencional vs arruamento com canais laterais

No fim de cada canal, a água é transferida por uma passagem hidráulica para o início do canal seguinte, ou, em caso de grandes caudais, parte dela é escoada por um sumidouro, colocado na berma do canal, e encaminhada para colector (de diâmetro inferior ao que seria normalmente necessário para a mesma área a drenar).

No modelo em SWMM, o nó final de cada canal está representado por um divisor de caudal (*divider* do tipo *overflow*), no entanto para as simulações de melhor qualidade permitidas pelo programa (*dynamic wave*) os divisores de caudal são tratados como caixas normais. Apesar de esta limitação significar que parte dos caudais que o modelo deveria encaminhar para canal são, em vez disso, passados para o colector, os resultados das simulações são encorajadores, pelo que somos também levados a considerar que os valores de redução de caudais de ponta obtidos podem ser encarados como conservativos.

- Modelo de sistema misto vs. colector (Figura 6.6).

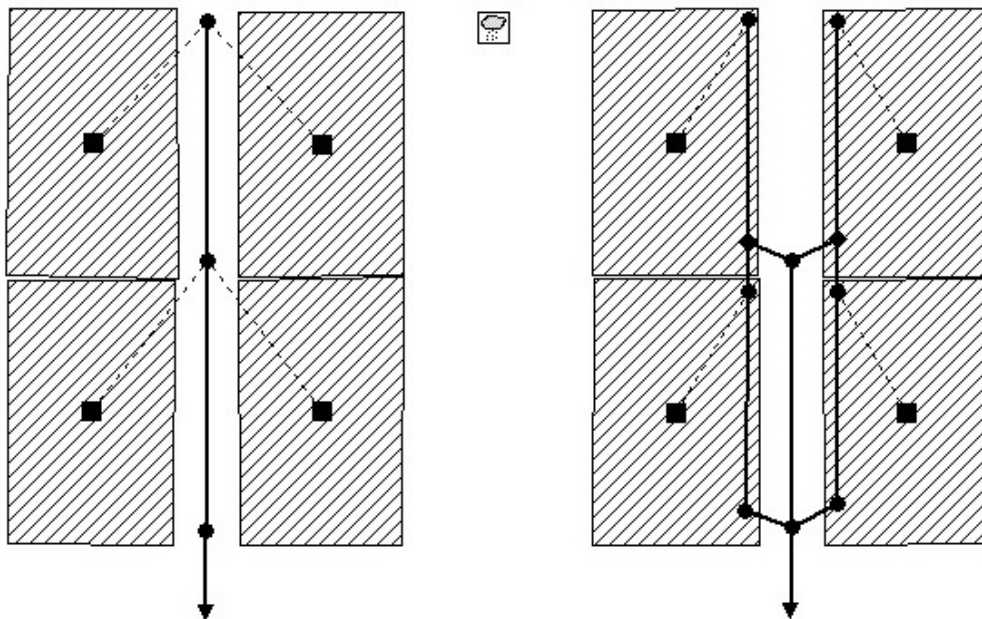


Figura 6.6 - Esquema do modelo de comparação de arruamentos (imagem do SWMM)

Bacias (iguais):

- Área: 4 x 600 m²
- Inclinação: 0,5 %
- 100 % impermeável

Sistema de drenagem em colector:

- Profundidade das caixas de visita: 1,4 m
- Diâmetro dos colectores: 300 mm
- Inclinação dos colectores: 5%
- Rugosidade dos colectores: $K = 77 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$
- Comprimentos:
 - 1º troço: 31 m
 - 2º troço: 35 m
 - 3º troço: 10 m

Sistema de drenagem em canal:

- Profundidade dos nós:
 - Nós iniciais: 10 cm

- Nós de ligação: 20 cm
- Caixas de visita:
 - 1ª: 1,3 m
 - 2ª: 1,4 m
- Largura dos canais: 2,5 m
- Profundidade máxima dos canais: 10 cm
- Diâmetro dos colectores:
 - 1º troço: 200 mm
 - 2º troço: 300 mm
- Inclinação dos canais e colectores: 5%
- Rugosidade dos canais: $K = 40m^{1/3} s^{-1}$
- Rugosidade dos colectores: $K = 77m^{1/3} s^{-1}$
- Comprimentos:
 - Canais (x4): 30 m
 - Colectores:
 - 1º troço: 35 m
 - 2º troço: 10 m

6.2 Dados de precipitação

Para modelar os efeitos da precipitação, levando em conta que se pretende obter resultados representativos do clima português, recorreu-se numa primeira abordagem às curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de Lisboa, constantes do Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais (Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações, 1995).

Escolheram-se os períodos de retorno (T) de 2, 20 e 100 anos e, a partir dos valores de intensidade de precipitação para cada duração entre um minuto e uma hora, construíram-se os hietogramas da Figura 6.7 para servir de base às simulações.

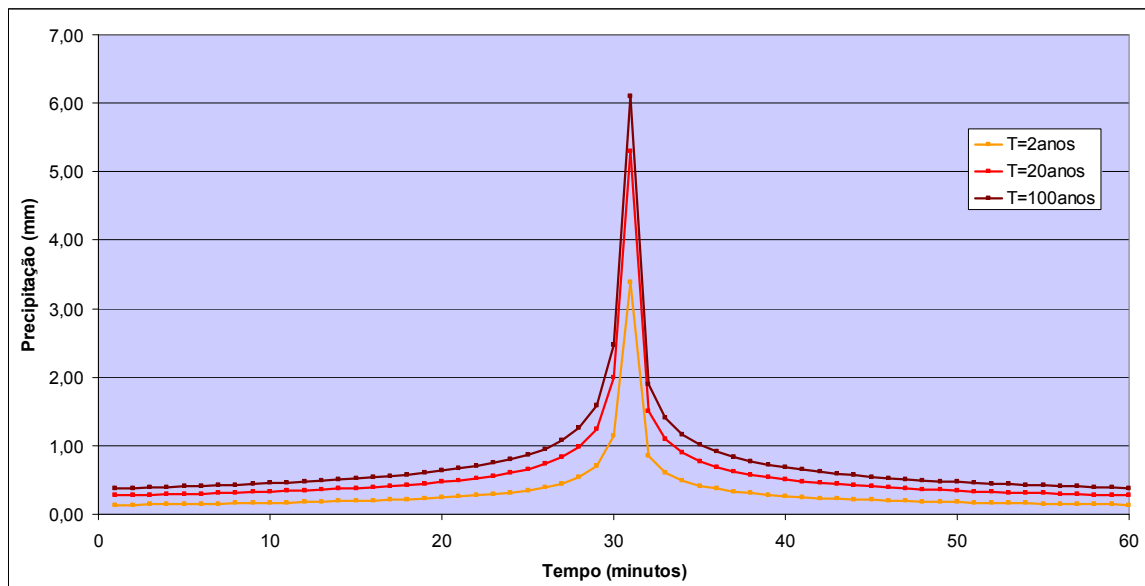


Figura 6.7 - Hietogramas baseados nas IDF de Lisboa, para T = 2, 20 e 100 anos

Para simular eventos retirados da realidade dos registos de precipitação na área abrangida pelas IDF referidas, começou por usar-se um hietograma retirado de uma série de precipitação, discretizada ao minuto, de São João da Talha para o ano de 2010 (gentilmente cedida pelos SMAS de Loures), representado no gráfico da Figura 6.8.

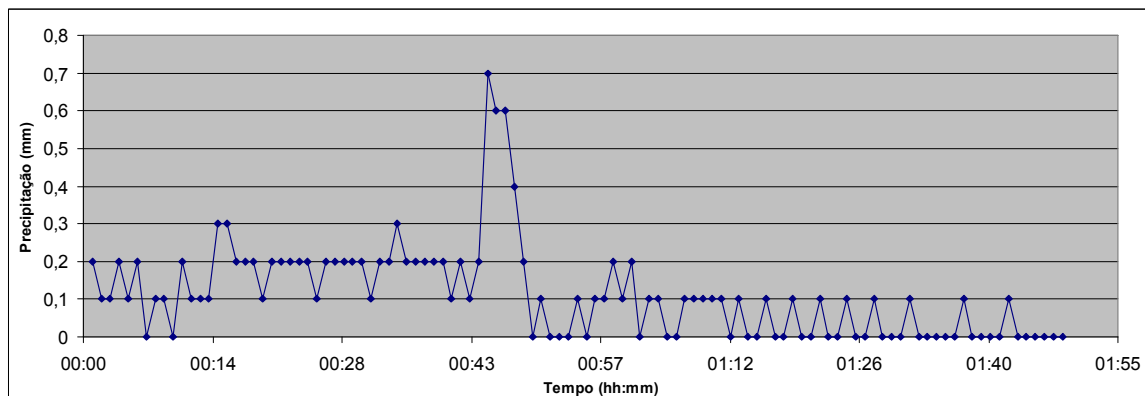


Figura 6.8 - Hietograma retirado da série de São João da Talha de 2010, respeitante ao dia 12 de Janeiro, com o pico às 10h12

Dado que este evento de precipitação (o maior da série) apresenta apenas um pico de alguma intensidade, sentiu-se a necessidade de encontrar registos com eventos em que as intensidades elevadas tivessem maiores durações, ou picos de maior intensidade, sempre com o intuito de ter hietogramas representativos do clima português.

Os hietogramas apresentados nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11, não sendo da zona de Lisboa, são provenientes da mesma região de influência das IDF, segundo o Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais. Os dados são de Coimbra, resultantes da digitalização dos modelos de registo diário por udógrafo de sifão da estação climatológica do Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra, localizada a 141 m de altitude. Estes hietogramas apresentam já intensidades consideráveis, capazes de dar uma melhor ideia da resposta dos sistemas propostos em condições de pluviosidade típicas de Portugal.

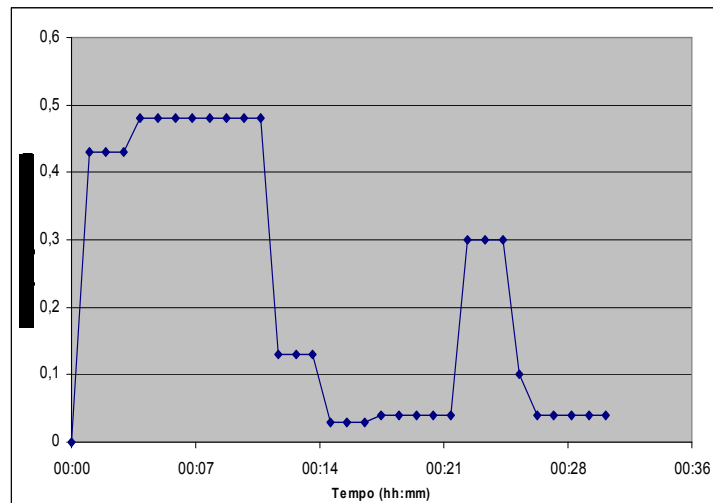


Figura 6.9 - Hietograma de 8/10/2004

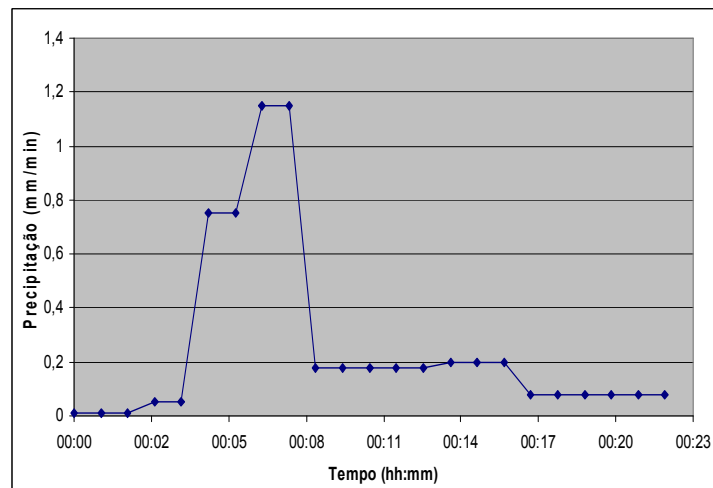


Figura 6.10 - Hietograma de 23/10/1999

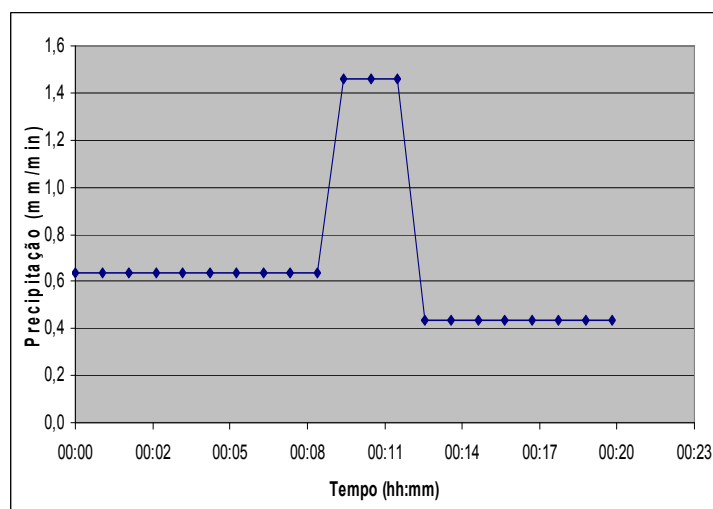


Figura 6.11 - Hietograma de 16/09/2002

7. Simulações

Tendo definido a primeira abordagem ao modelo e escolhido as séries de precipitação a utilizar, correu-se o modelo para as curvas IDF de Lisboa, com discretização de cálculo estabelecida para um segundo (1 s) e registo de resultados intermédios a cada trinta segundos (30 s). Usou-se o modo de cálculo “*dynamic wave*”.

Para estimar o efeito de algumas variáveis sobre o desempenho do sistema, realizaram-se diversas alterações aos cenários de base para permitir comparar os resultados das simulações em diferentes condições.

Alterou-se a rugosidade dos canais para se fazer uma gama de simulações com rugosidades de $K = 77\text{m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ (igual à dos colectores), para estimar os efeitos do aumento de raio hidráulico proporcionado pelos canais. De seguida foram efectuadas simulações com rugosidades dos canais de $K= 33$ e $20\text{m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ (para além das já efectuadas com $K=40\text{m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$), o que permitiu ter uma noção da redução dos caudais de ponta em função da variação das rugosidades. Por ser um processo relativamente simples, adoptou-se a prática de simular esta gama de rugosidades para todos os cenários.

Considerando que:

- este estudo se inspira nas valas revestidas com vegetação enquanto estruturas de transporte de caudais,
- as valas revestidas com vegetação, a inclinações de 5%, estão no limite da sua aplicabilidade, devendo já ser projectadas com barreiras para maior resistência ao escoamento.

Apesar de as inclinações na sub-bacia que serve de base a esta reflexão serem da ordem dos 5%, decidiu-se fazer um conjunto de simulações com a inclinação normalmente recomendada para as valas revestidas com vegetação, ou seja, 1%. Para isso o modelo base teve que ser alterado em conformidade, nas cotas de todos os nós, para reflectir esta mudança de inclinação. Com isto podemos ter uma noção da variação de eficiência na atenuação de caudais de ponta em função da inclinação do sistema.

Considerou-se que modelar apenas um arruamento de 60 metros, apesar de nos dar uma base simples de trabalho, seria pouco representativo dos efeitos cumulativos dos

muitos arruamentos que constituem uma bacia urbana. Para ter um indicador do efeito de aplicação destes princípios, em maior escala, alterou-se o modelo duplicando o sistema, tanto em paralelo como em série, para estimar se os efeitos seriam cumulativos, aumentando com o aumento da rede, se manteriam na mesma ordem de grandeza, ou se os ganhos em controlo de caudais de ponta se atenuariam com o aumento da dimensão da rede. Estas alterações foram feitas tanto para inclinações de 5% como de 1%.

É de referir que no caso da duplicação do sistema em paralelo, foi necessário introduzir mais um troço que recolhe a água das duas sub-bacias. Para minimizar a sua influência no desempenho dos sistemas, esse troço foi modelado como colector em todos os casos (tanto para sistemas de colectores como para sistemas de canais ou sistemas mistos). No caso da duplicação em série a junção dos dois módulos é feita topo a topo, pelo que os sistemas mantêm as suas características ao longo do seu desenvolvimento, apenas se aumentando os diâmetros dos colectores (a partir do 2º nó dos colectores) para fazer face aos caudais mais elevados.

As Figuras 7.1 a 7.4 mostram a configuração dos vários cenários de modelação admitidos para duplicação dos sistemas simples anteriormente estudados.

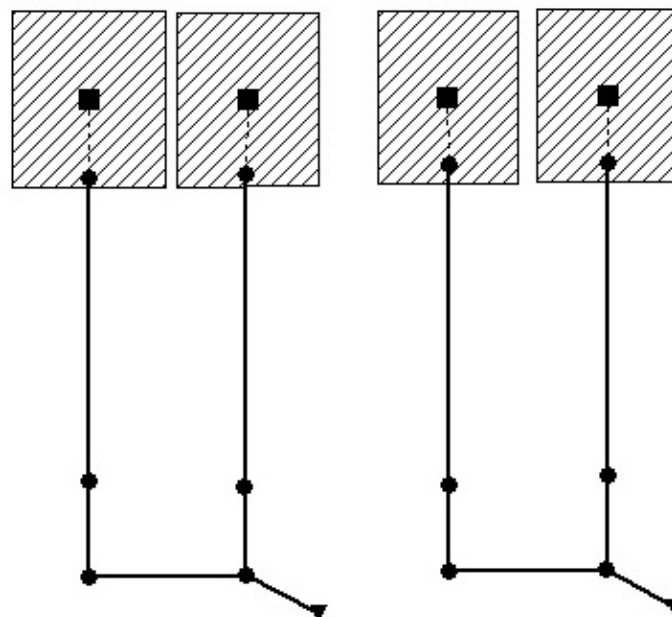


Figura 7.1 - Esquema do modelo simplificado duplo em paralelo (imagem do SWMM)

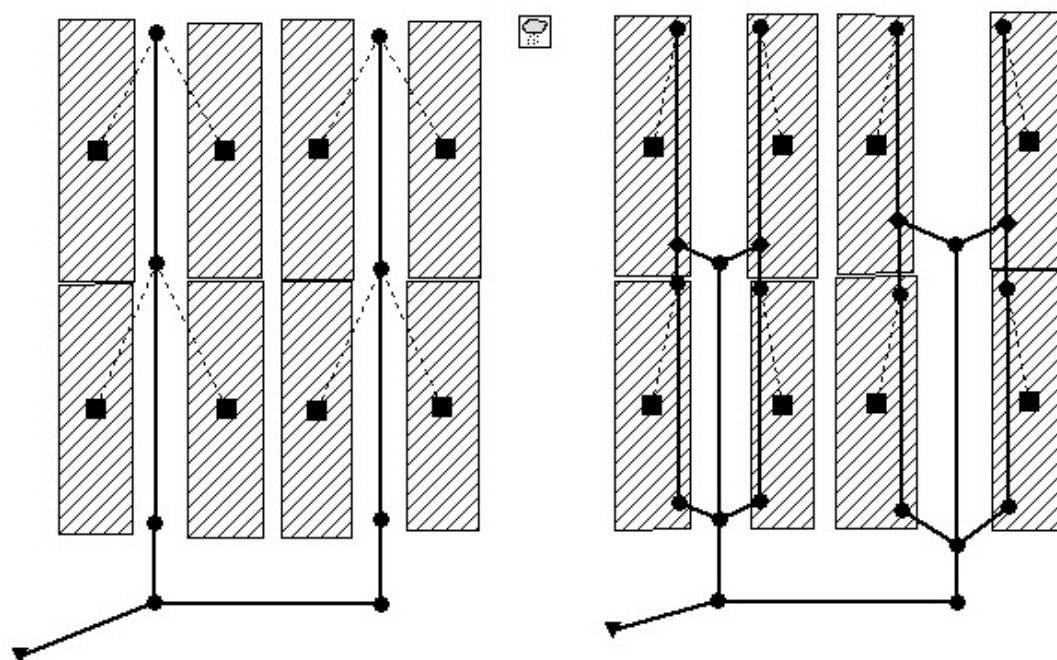


Figura 7.2 - Esquema do modelo de comparação de arruamentos, duplo, em paralelo

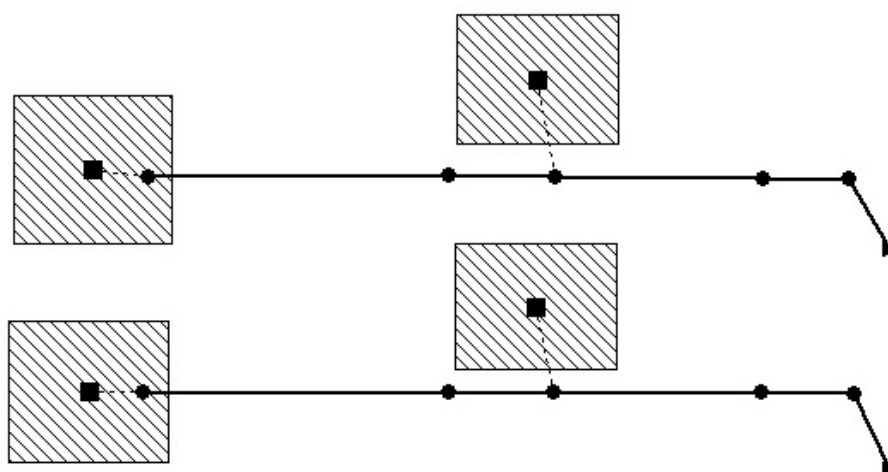


Figura 7.3 - Esquema do modelo simplificado duplo em série

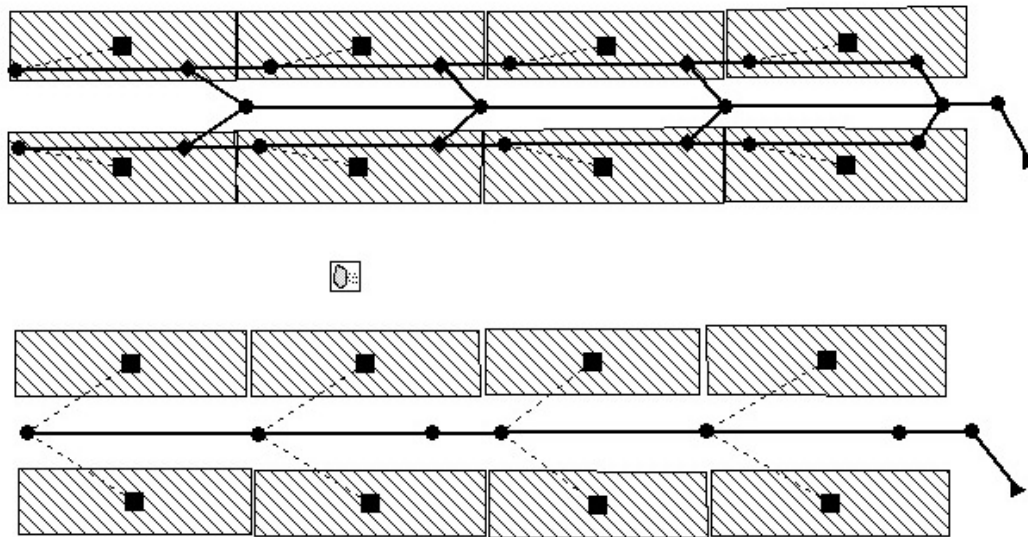


Figura 7.4 - Esquema do modelo de comparação de arruamentos, duplo, em série

Em resumo, simularam-se diversos cenários levando em conta: variações da rugosidade dos canais; variações de inclinação; variações da dimensão e disposição do sistema; e diversos eventos de precipitação.

7.1 Tempos de Concentração

Para aferir os tempos de concentração das várias configurações do modelo, fez-se correr uma simulação com precipitação constante (15 mm/h) para cada uma delas, em que se considerou que o tempo de concentração seria o momento, contado desde o início da precipitação, em que o caudal no último troço do sistema atingisse 0,05 L/s abaixo do caudal máximo verificado para essa precipitação. Optou-se por dar este pequeno ajuste por defeito porque se está numa zona do hidrograma em que os acréscimos a cada intervalo de registo de resultados são muito pequenos e, na prática, 0,05 L/s a menos é negligenciável. Não ter abordado o problema desta forma significaria estar a estimar os tempos de concentração em 3 a 4 minutos a mais depois de os caudais estarem praticamente estabilizados.

Os resultados desta análise podem ver-se nos Quadros 7-1 e 7-2:

Quadro 7-1 - Tempos de concentração dos sistemas mistos e de colectores equivalentes

	Tempos de Concentração (minutos)					
	Configurações com $i = 1\%$			Configurações com $i = 5\%$		
	Simples	Paralelo	Série	Simples	Paralelo	Série
Colectores	36,5	41,0	41,0	36,0	40,5	40,5
Sist. Misto $K = 77 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$	38,5	42,5	42,5	37,0	41,5	41,5
Sist. Misto $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$	39,0	44,0	43,5	37,5	42,0	42,0
Sist. Misto $K = 33 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$	40,5	45,0	44,5	37,5	42,0	42,0
Sist. Misto $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$	45,0	50,0	49,0	38,5	43,0	43,0

Quadro 7-2 - Tempos de concentração dos sistemas de canais, e de colectores equivalentes

	Tempos de Concentração (minutos)					
	Configurações com $i = 1\%$			Configurações com $i = 5\%$		
	Simples	Paralelo	Série	Simples	Paralelo	Série
Colectores	16,0	20,5	20,0	13,5	18,5	19,5
Canais $K = 77 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$	17,0	22,5	22,0	14,0	19,0	20,5
Canais $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$	18,5	26,0	23,0	15,0	20,0	23,5
Canais $K = 33 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$	18,0	27,0	22,5	15,5	20,5	25,0
Canais $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$	26,0	44,5	32,0	17,0	19,5	28,0



8. Apresentação e discussão de resultados

8.1 Simulações com modelos simplificados – canais vs colectores

O primeiro conjunto de simulações que se apresenta refere-se à modelação do comportamento dos modelos simples, comparativos de escoamento em colector com escoamento em canal apenas. Com cenários de variação de precipitação (IDF de Lisboa para $T = 2, 20$ e 100 anos), variação da rugosidade dos canais ($K = 77, 40, 33$ e $20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$), variação da dimensão e configuração dos sistemas (sistema simples, duplicação da dimensão do sistema em paralelo e em série) e variação da inclinação (1% e 5%).

Inclinações de 1%

Para a inclinação de 1% , verifica-se que as percentagens de atenuação de caudais de ponta, calculados para o último troço de cada sistema, são significativas. Como pode ver-se no gráfico da Figura 8.1 apresentado para um sistema simples de colectores vs. canais e a precipitação baseada na IDF de Lisboa respeitante a um período de retorno de 20 anos.

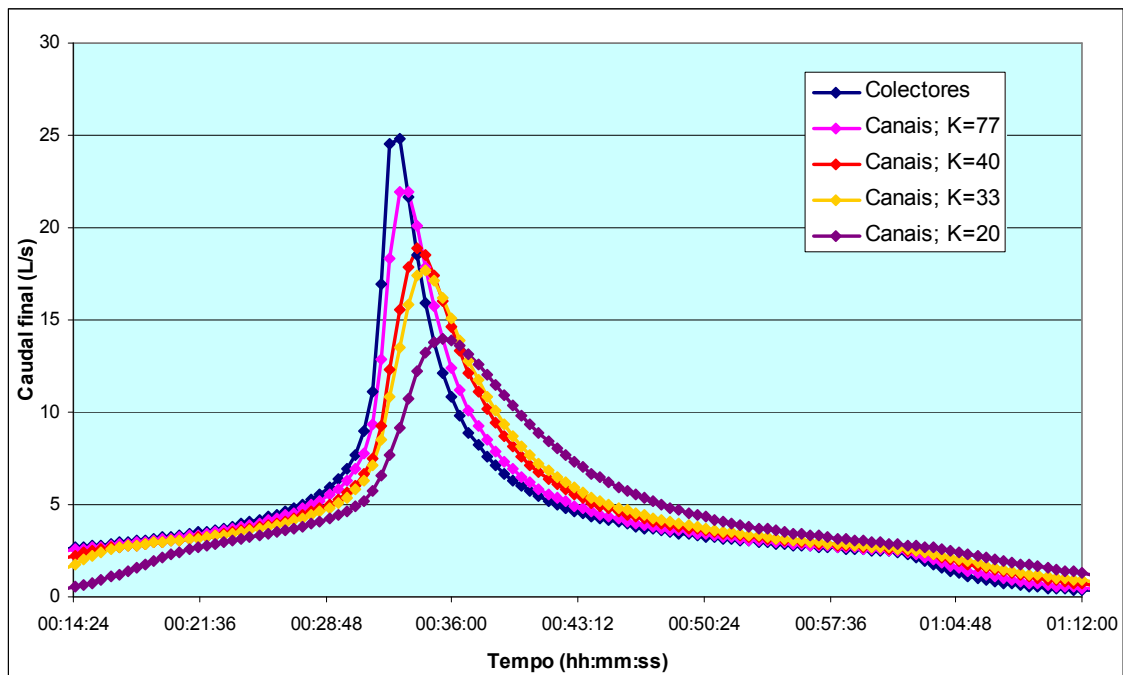


Figura 8.1 - Efeitos da rugosidade na atenuação do caudal de ponta, para a comparação de colectores simples com canais simples (tudo com $i = 1\%$), sujeitos à precipitação correspondente à IDF de Lisboa com $T = 20$ anos

Para o conjunto de resultados, respeitante a todas as simulações de modelos simplificados de comparação do comportamento do escoamento em colectores com o escoamento em canais a 1% de inclinação, veja-se o Quadro 8-1.

Quadro 8-1 - Atenuação da ponta de cheia em canais ($i = 1\%$), como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos às IDF de Lisboa para $T = 2, 20$ e 100 anos

Rugosidade dos canais		Atenuação da ponta (%)								
		Canal vs Colector simples			2 Canais vs 2 Colectores (paralelo)			2 Canais vs 2 Colectores (série)		
n	K	T = 2 a	T = 20 a	T = 100 a	T = 2 a	T = 20 a	T = 100 a	T = 2 a	T = 20 a	T = 100 a
0,013	77	14,7	11,5	10,4	17,3	15,6	15,5	16,7	13,4	13,5
0,025	40	28,6	23,9	23,4	33,7	31,0	30,0	32,4	28,8	27,6
0,03	33	33,3	28,6	27,8	39,2	36,2	34,8	38,0	33,9	32,4
0,05	20	48,5	43,7	42,2	54,3	51,5	49,5	52,0	48,5	46,4

O gráfico da Figura 8.2 é uma representação das eficiências de atenuação em função da rugosidade dos canais, em que as linhas da mesma cor representam uma mesma configuração de sistema e pontos da mesma cor representam um mesmo período de retorno. Pode ver-se que as linhas laranja indicam uma melhor eficiência da configuração em paralelo e os pontos a azul indicam que a atenuação das pontas é maior para eventos mais frequentes.

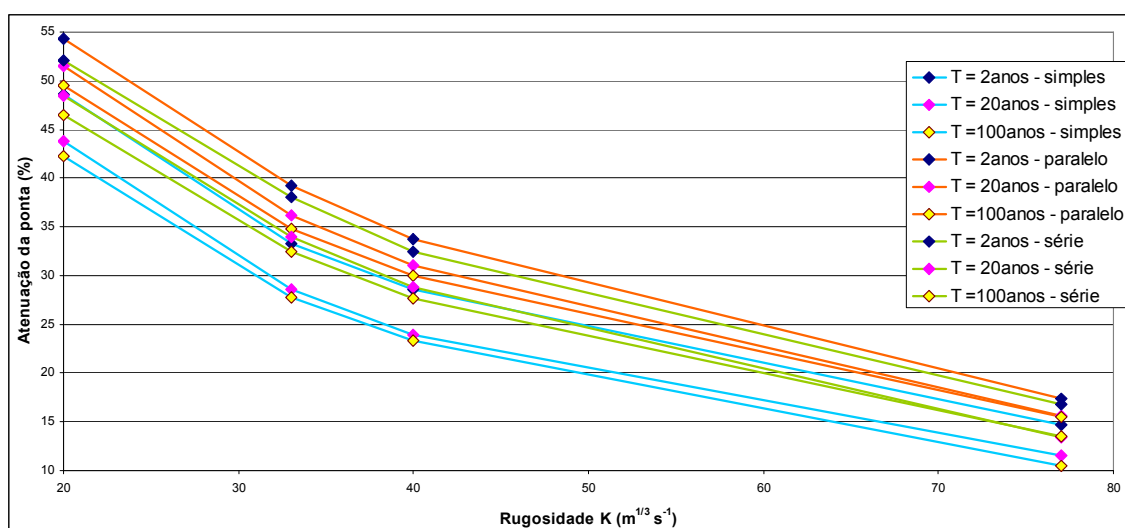


Figura 8.2 - Representação gráfica dos valores de atenuação de caudais de ponta em função da rugosidade para cada período de retorno ($i = 1\%$)

É de realçar que, neste cenário de escoamento em colector vs. escoamento superficial a 1% de inclinação, o aumento do raio hidráulico proporcionado pelos canais é já uma boa vantagem como se vê pelas simulações realizadas com a rugosidade dos canais igual à dos colectores.

Já os atrasos na ocorrência da ponta, devido à diminuição das velocidades de escoamento, são pequenos quando comparados com a duração do evento, mas significativos se comparados com a duração da ponta, como se pode ver pelos desfasamentos segundo o eixo das abcissas que se observam no gráfico da figura.

Quanto à configuração do sistema, os resultados deste cenário apontam para uma melhor eficiência na atenuação de pontas para sistemas em paralelo do que para sistemas em série, e uma melhoria também com o aumento da dimensão do sistema.

Inclinações de 5%

Simulando as mesmas condições de configuração, rugosidade e precipitação, mas variando a inclinação dos sistemas para 5%, obtêm-se resultados menos favoráveis, tanto ao nível da redução dos caudais de ponta como dos atrasos verificados.

Pode ver-se no gráfico da Figura 8.3, apresentado para um sistema simples de colectores vs. canais e a precipitação baseada na IDF de Lisboa respeitante a um período de retorno de 20 anos, que todo ele é menos atenuado se comparado com o resultante das simulações para $i = 1\%$, a contribuição do aumento do raio hidráulico é muito pequena e os atrasos na ocorrência da ponta são incipientes.

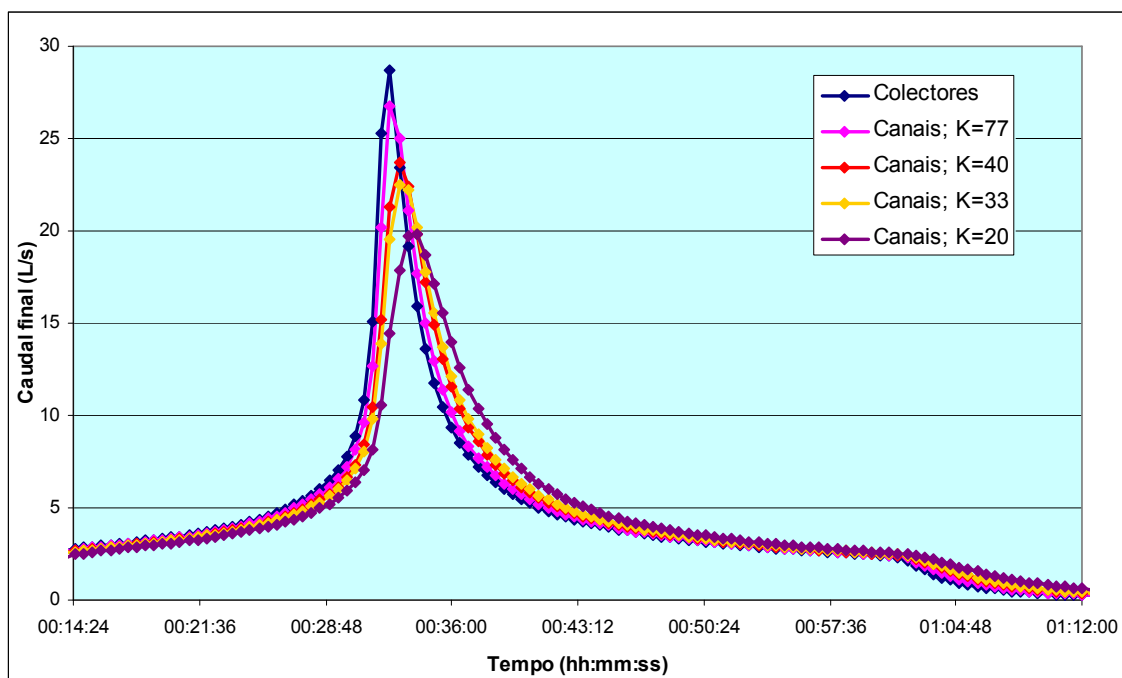


Figura 8.3 - Efeitos da rugosidade na atenuação do caudal de ponta, para a comparação de colectores simples com canais simples (tudo com $i = 5\%$), sujeitos à precipitação correspondente à IDF de Lisboa com $T = 20$ anos

Para o conjunto de resultados, respeitante a todas as simulações de modelos simplificados de comparação do comportamento do escoamento em colectores com o escoamento em canais a 5% de inclinação, veja-se o Quadro 8-2.

Quadro 8-2 - Atenuação da ponta de cheia em canais ($i = 5\%$), como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos às IDF de Lisboa para $T = 2, 20$ e 100 anos

Rugosidade dos canais		Atenuação da ponta (%)								
		Canal vs Colector simples			2 Canais vs 2 Colectores (paralelo)			2 Canais vs 2 Colectores (série)		
n	K	T = 2 a	T = 20 a	T = 100 a	T = 2 a	T = 20 a	T = 100 a	T = 2 a	T = 20 a	T = 100 a
0,013	77	11,1	6,6	3,6	7,8	11,2	10,1	14,3	14,0	13,3
0,025	40	21,7	17,3	14,6	19,1	20,7	18,4	28,9	27,9	25,8
0,03	33	25,1	21,4	17,8	22,0	22,9	21,6	33,0	31,7	29,7
0,05	20	35,1	30,9	27,3	31,7	32,0	29,7	44,1	42,4	39,9

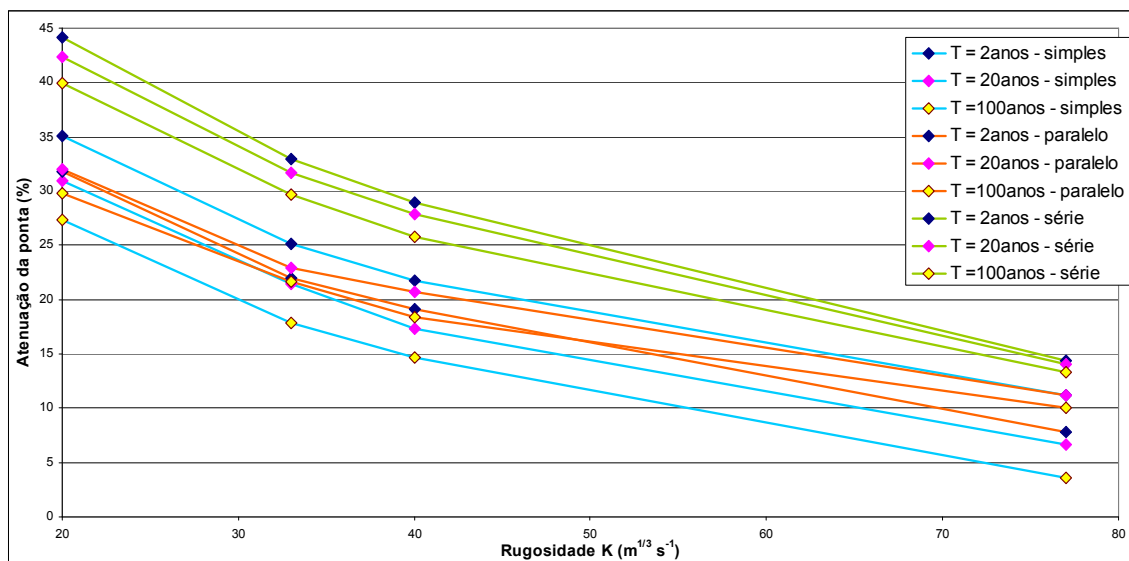


Figura 8.4 - Representação gráfica dos valores de atenuação de caudais de ponta em função da rugosidade para cada período de retorno ($i = 5\%$)

É interessante notar que, para este cenário de maior inclinação, observamos uma redução da eficiência de atenuação de caudais de ponta para a configuração do sistema em paralelo, quando comparada com as outras. Pode observar-se no gráfico da Figura 8.4 (e nos valores da Quadro 8-2) que as linhas a laranja, que representam o sistema duplo em paralelo, não apresentam ganhos de eficiência significativos quando comparadas com o sistema simples, que tem metade da dimensão (o sistema em paralelo até apresenta pior eficiência para eventos com $T = 2$ anos).

Já a duplicação do sistema em série apresenta ganhos de eficiência relativamente ao sistema simples, tal como para inclinações de 1%, e neste caso, também ao sistema em paralelo.

8.2 Simulações com modelos representando pequenos arruamentos – Sistemas mistos de canais e colectores

Os resultados que se apresentam a seguir são relativos às simulações efectuadas com os modelos que se pretendem representar mais de perto uma situação real, comparando um pequeno arruamento drenado por colectores com outro em igualdade de circunstâncias, mas drenado por canais superficiais, tendo colectores para servir de capacidade de drenagem dos volumes que excedam a capacidade dos canais. Tal como para o conjunto de simulações anteriormente apresentado, consideraram-se

cenários de variação de precipitação (IDF de Lisboa para $T = 2, 20$ e 100 anos), variação da rugosidade dos canais ($K = 77, 40, 33$ e $20\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$), variação da dimensão e configuração dos sistemas (sistema simples, duplicação da dimensão do sistema em paralelo e em série) e variação da inclinação (1% e 5%).

Relativamente a estas simulações, deve referir-se novamente que o programa utilizado para as correr (SWMM) não permite simular o comportamento do modelo da forma mais próxima da realidade (opção de cálculo dynamic wave) e simultaneamente simular os nós de divisão de caudais com as características definidas, sendo neste caso tratados como caixas normais. Face a esta limitação, optou-se por uma boa simulação do comportamento da água no sistema, apesar de se ter consciência que os canais estariam a ser simulados em subaproveitamento. Isto não foi considerado um problema por ser mais uma forma de o estudo ficar do lado da segurança, ou seja, havendo resultados positivos de atenuação de pontas de cheia com a solução proposta, e sabendo que esta não estava a ser simulada no seu máximo potencial de eficiência, os resultados do modelo teriam que estar muito desfasados da realidade para não serem transferíveis para situações reais. Dado que, apesar de ser um software de utilização livre, o SWMM é usado internacionalmente em situações reais, com resultados considerados válidos, confia-se, neste caso, que a adesão à realidade é boa para se poderem tirar ilações dos resultados obtidos.

Inclinações de 1%

Simulando o sistema misto, verifica-se que as percentagens de atenuação de caudais de ponta, comparando com os caudais do sistema de colectores, são menores do que nos casos anteriores (colectores vs. canais). Pode observar-se isso mesmo comparando o gráfico apresentado anteriormente, relativo aos resultados das simulações anteriores para inclinações de 1% , com o gráfico da Figura 8.5 para um sistema simples de colectores vs. sistema misto de canais e colectores, sujeitos à precipitação baseada na IDF de Lisboa respeitante a um período de retorno de 20 anos.

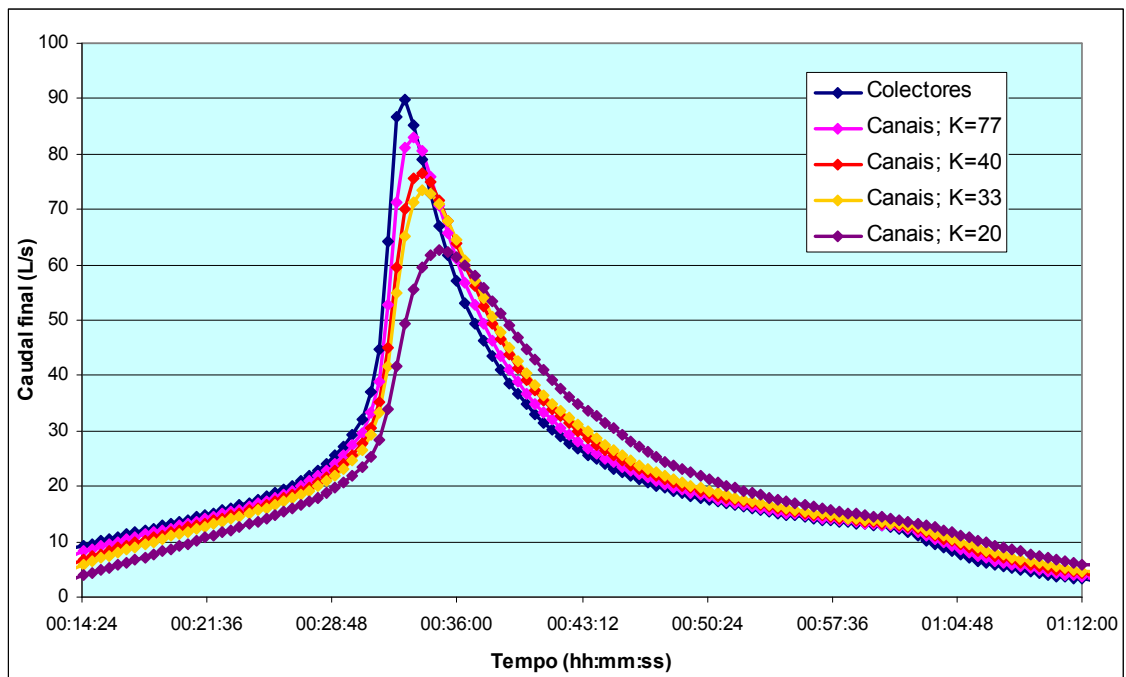


Figura 8.5 - Efeitos da rugosidade na atenuação do caudal de ponta, para a comparação de colectores simples com um sistema misto de canais e colectores (tudo com $i = 1\%$), sujeitos à precipitação correspondente à IDF de Lisboa com $T = 20$ anos

Para o conjunto de resultados, respeitante a todas as simulações de modelos de arruamentos comparando o comportamento do escoamento em colectores com o escoamento em sistema misto de canais e colectores a 1% de inclinação, veja-se o Quadro 8-3.

Quadro 8-3 - Atenuação da ponta de cheia em sistemas mistos de canais e colectores ($i = 1\%$), como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos às IDF de Lisboa para $T = 2, 20$ e 100 anos

Rugosidade dos canais		Atenuação da ponta (%)								
		S. misto vs Colector simples			2 S. mistos vs 2 Colector (paralelo)			2 S. mistos vs 2 Colector (série)		
n	K	T = 2 a	T = 20 a	T = 100 a	T = 2 a	T = 20 a	T = 100 a	T = 2 a	T = 20 a	T = 100 a
0,013	77	10,8	7,5	5,9	7,4	5,8	3,6	8,2	15,4	20,5
0,025	40	18,9	14,9	12,0	15,2	12,4	8,5	14,8	18,7	22,5
0,03	33	23,7	18,3	14,6	19,8	15,5	10,9	18,1	20,2	23,4
0,05	20	34,2	30,3	26,3	30,5	27,4	22,3	30,6	27,6	30,3

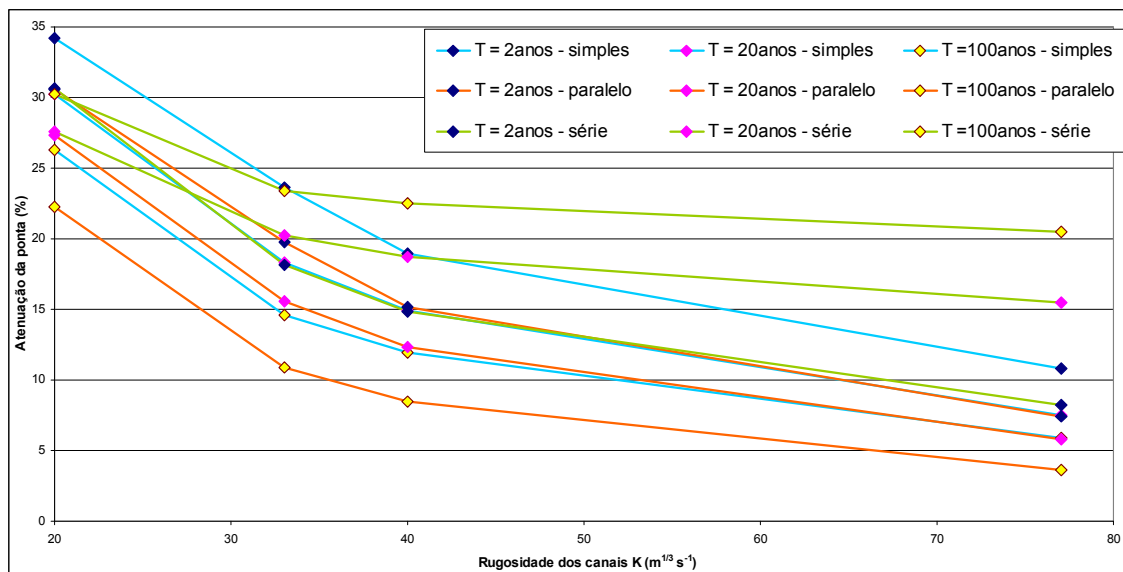


Figura 8.6 - Representação gráfica dos valores de atenuação de caudais de ponta em função da rugosidade para cada período de retorno ($i = 1\%$)

Para as simulações de arruamentos, comparando o sistema misto com o sistema de colectores e inclinação de 1%, observa-se (Figura 8.6) que os piores desempenhos se verificam para o sistema duplicado em paralelo, ao passo que os melhores são para o sistema em série, à excepção do tempo de retorno de 2 anos, em que o sistema em série apresenta o seu pior desempenho, semelhante ao do sistema em paralelo, ambos piores do que o do sistema simples.

É de notar que as simulações para o sistema duplicado em série apontam para um comportamento atípico, se comparado com as restantes simulações, em que o desempenho do sistema melhora com volumes de precipitação crescentes. Isto pode dever-se ao facto de, por o escoamento ser repartido entre os canais e os colectores, estes terem menor diâmetro que no sistema só de colectores, tornando o sistema misto constrangido à capacidade de vazão dos colectores. Para eventos de precipitação elevada, cria-se um tecto máximo de caudais para a componente do sistema que tem maiores velocidades de escoamento, constrangimento esse que não se faz sentir no sistema só de colectores.

Inclinações de 5%

As simulações de sistemas mistos (canais e colectores) comparativas com sistemas de colectores, para inclinações de 5%, deram resultados de acordo com o esperado. Apresentaram uma pior capacidade de atenuação de pontas de cheia do que qualquer um dos restantes cenários simulados. Para efeitos de comparação com os restantes gráficos apresentados anteriormente, pode ver-se a pequena capacidade de atenuação que demonstra o gráfico da Figura 8.7 para um sistema simples de colectores vs. sistema misto de canais e colectores, sujeitos à precipitação baseada na IDF de Lisboa respeitante a um período de retorno de 20 anos.

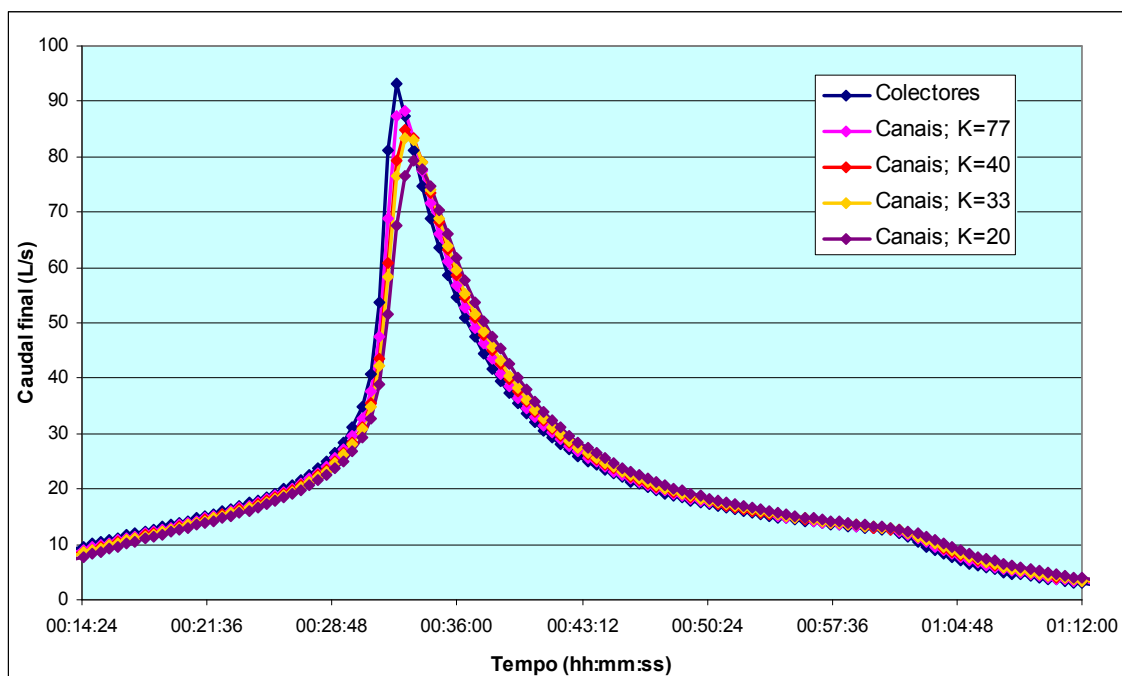


Figura 8.7 - Efeitos da rugosidade na atenuação do caudal de ponta, para a comparação de colectores simples com um sistema misto de canais e colectores (tudo com $i = 5\%$), sujeitos à precipitação correspondente à IDF de Lisboa com $T = 20$ anos

Para o conjunto de resultados, respeitante a todas as simulações de modelos de arruamentos comparando o comportamento do escoamento em colectores com o escoamento em sistema misto de canais e colectores a 5% de inclinação, veja-se o Quadro 8-4 e o gráfico da Figura 8.8.

Quadro 8-4 - Atenuação da ponta de cheia em sistemas mistos de canais e colectores ($i = 5\%$), como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos às IDF de Lisboa para $T = 2, 20$ e 100 anos

Rugosidade dos canais		Atenuação da ponta (%)								
		S. misto vs Colector simples			2 S. mistos vs 2 Colector (paralelo)			2 S. mistos vs 2 Colector (série)		
		$T = 2$ a	$T = 20$ a	$T = 100$ a	$T = 2$ a	$T = 20$ a	$T = 100$ a	$T = 2$ a	$T = 20$ a	$T = 100$ a
n	K									
0,013	77	6,1	5,6	4,4	3,9	3,7	4,1	4,3	4,4	5,1
0,025	40	9,9	8,9	7,6	8,0	7,8	7,9	8,8	8,8	9,3
0,03	33	11,3	10,7	9,0	9,0	8,9	9,3	9,9	10,2	10,2
0,05	20	16,3	15,0	13,6	13,9	14,0	13,0	15,2	15,6	15,0

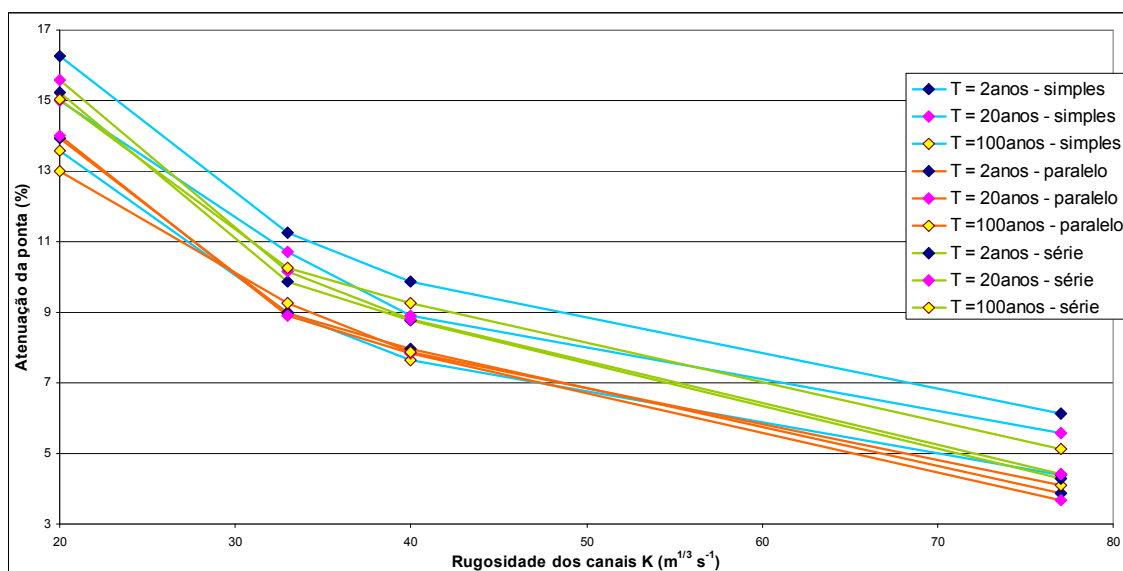


Figura 8.8 - Representação gráfica dos valores de atenuação de caudais de ponta em função da rugosidade para cada período de retorno ($i = 1\%$)

Para além de manifestamente fraca a capacidade de atenuação de caudais de ponta para sistemas mistos de canais e colectores, com inclinações de 5% , que as simulações indiciam, há também que considerar que o aumento da dimensão do sistema em paralelo dá piores resultados do que o sistema simples de pequena dimensão, e mesmo para os sistemas em série só parece haver melhorias de desempenho para eventos extremos ($T = 100$ anos), comparativamente ao comportamento do sistema de arruamento isolado.

8.3 Simulações com eventos de precipitação registados

- *Hietograma de São João da Talha*

O registo de precipitação utilizado neste conjunto de simulações é representativo de eventos frequentes. Apresenta precipitação de baixa intensidade, relativamente constante, e um pico de curta duração com 0,7 mm de precipitação num minuto seguido de 0,6 mm em cada um dos dois minutos seguintes, baixando para 0,4 mm durante mais um minuto voltando depois a precipitações mais fracas.

Simulando este hietograma no modelo de arruamento, com 1% e 5% de inclinação, para sistema de drenagem misto de canais e colectores comparado com sistema de colectores puro, observa-se que as percentagens de atenuação do caudal de ponta são pequenas em qualquer das três configurações avaliadas (arruamento simples, duplicação em paralelo e em série) para inclinações de 1%. Para inclinações de 5%, as percentagens de atenuação são incipientes, como se pode verificar no Quadro 8-5.

Quadro 8-5 - Atenuação da ponta de cheia em sistemas mistos de canais e colectores, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos ao hietograma de S. João da Talha

Rugosidade dos canais		Atenuação da ponta (%)					
		Arruamento a 1% de inclinação			Arruamento a 5% de inclinação		
n	K	Simples	Duplo em paralelo	Duplo em série	Simples	Duplo em paralelo	Duplo em série
0,013	77	5,6	5,0	4,5	1,6	2,1	2,0
0,025	40	11,3	10,7	9,5	4,0	4,5	4,6
0,03	33	14,6	13,9	12,0	5,0	5,3	5,4
0,05	20	22,4	21,3	20,5	8,8	9,0	9,3

Para dar uma noção visual do comportamento dos sistemas face a esta precipitação, com base nas simulações efectuadas, apresenta-se o gráfico da Figura 8.9, que compara os escoamentos no troço final do sistema, tanto no caso do arruamento simples como da duplicação do sistema em paralelo, para canais de rugosidade $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ e inclinação de 1%.

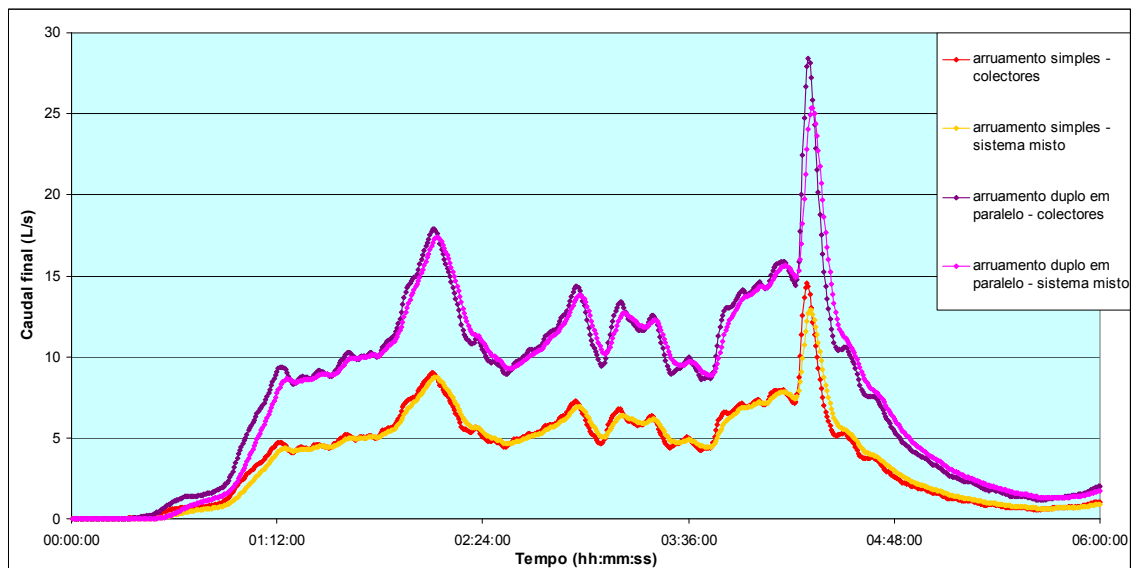


Figura 8.9 - Caudais no último troço do sistema, para a comparação de colectores simples com um sistema misto de canais e colectores (tudo com $i = 1\%$), sujeitos à precipitação correspondente ao hietograma de S. João da Talha de 12/01/2010

É de notar que, ao longo dos hidrogramas, se nota sempre uma diminuição das pontas para os sistemas mistos relativamente aos sistemas de colectores. No entanto, a diminuição percentual é muito pequena a não ser para o pico de cheia propriamente dito que, mesmo assim, só é atenuado em cerca de 10%.

No caso deste tipo de evento de precipitação, que ocorre com regularidade, o facto de não se conseguir obter uma redução significativa dos caudais de ponta não é preocupante para a gestão do sistema, principalmente porque o sistema tem que estar dimensionado para lidar com os caudais gerados associados a estes eventos frequentes.

Caso se pretenda conseguir obter benefícios da atenuação de caudais, mesmo para eventos de fraca intensidade, teria que se optar por escoamento superficial em canais dedicados (em vez do sistema misto) com rugosidades controladas acima de $n = 0,05$ ($K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$), o que se consegue com relva pouco cortada desde que se garanta alturas de escoamento inferiores a 10 cm (Center for Watershed Protection, 2012).

Pode verificar-se, pelo Quadro 8-6, que as simulações efectuadas apontam para reduções apreciáveis dos caudais de ponta, mesmo para inclinações de 5%, quando se faz a drenagem em canais a céu aberto em vez de se fazer em colector.

Quadro 8-6 - Atenuação da ponta de cheia em canais, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos ao hietograma de S. João da Talha

Rugosidade dos canais		Atenuação da ponta (%)					
		Canais a 1% de inclinação			Canais a 5% de inclinação		
n	K	Simples	Duplo em paralelo	Duplo em série	Simples	Duplo em paralelo	Duplo em série
0,013	77	8,6	12,1	12,3	3,5	3,5	9,8
0,025	40	20,5	25,6	26,6	10,1	10,5	21,2
0,03	33	24,9	30,0	30,5	21,4	13,0	24,3
0,05	20	35,7	39,7	39,2	31,0	21,4	32,5

Há a considerar que este tipo de abordagem tem maior impacto em meio urbano, por obrigar a canais dedicados que, pelo menos em tempo de chuva, não podem servir outro propósito para usufruto da população. Considerando o valor do terreno em zonas urbanas, o uso de longas faixas para drenagem pode ser encarado como um desperdício. Para contrariar esta visão, pode optar-se por um trabalho cuidado de paisagismo associado à engenharia da drenagem, para que as faixas de espaço verde resultantes sejam encaradas como positivas, tanto pela população, como pelos decisores políticos.

- *Hietograma de Coimbra a 8/10/2004*

Os resultados apresentados a seguir referem-se às simulações efectuadas para um hietograma caracterizado por um intervalo relativamente longo de precipitação intensa, mas não exagerada, com 11 minutos acima de 26 mm/h. Considerou-se importante utilizar este hietograma para simular o comportamento dos sistemas por ter um patamar de precipitação intensa, em vez de um pico. Esta precipitação tem um pequeno período de retorno, pelo que cai na categoria dos eventos frequentes.

No Quadro 8-7 pode observar-se que os melhores desempenhos de atenuação de caudais de ponta se verificam para a configuração em paralelo, no caso de inclinações a 1% e para a configuração em série para inclinações de 5%.

É também de notar que, estando em presença de precipitações mais intensas do que no conjunto anterior de simulações, o desempenho dos sistemas melhorou, o que aponta para uma capacidade de resposta eficaz para eventos extremos. Em todo o caso, mais uma vez se observa que, para canais com $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, os sistemas

mistos não obtêm reduções de caudal suficientemente grandes para justificar a sua aplicação, isso só acontece para rugosidades maiores.

Quadro 8-7 - Atenuação da ponta de cheia em sistemas mistos de canais e colectores, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos ao hietograma de Coimbra a 8/10/2004

Rugosidade dos canais		Atenuação da ponta (%)					
		Arruamento a 1% de inclinação			Arruamento a 5% de inclinação		
n	K	Simples	Duplo em paralelo	Duplo em série	Simples	Duplo em paralelo	Duplo em série
0,013	77	6,7	7,3	6,4	3,7	3,5	4,1
0,025	40	14,9	15,2	12,6	6,0	6,0	6,8
0,03	33	20,5	20,5	17,3	6,9	6,8	7,6
0,05	20	35,1	35,0	32,4	11,5	11,1	12,5

Para se ver o andamento das curvas dos hidrogramas para as simulações de arruamento simples e duplicação do sistema em paralelo (inclinação de 1% e $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$), apresenta-se o gráfico da Figura 8.10.

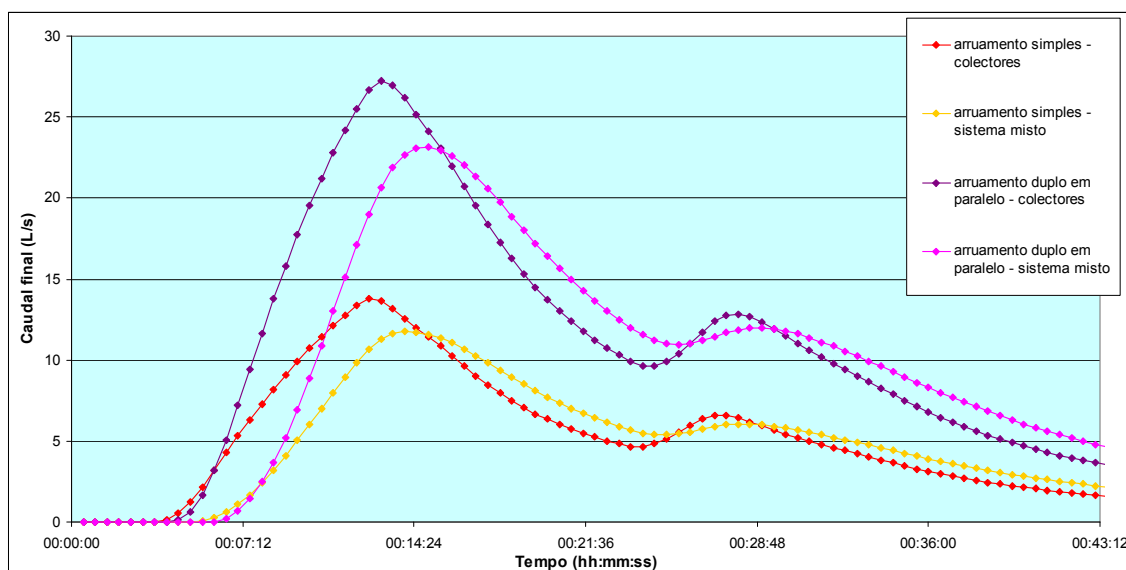


Figura 8.10 - Caudais no último troço do sistema, para a comparação de colectores simples com um sistema misto de canais e colectores (tudo com $i = 1\%$), sujeitos à precipitação correspondente ao hietograma de Coimbra a 8/10/2004

Para inclinações de 5%, mais uma vez se observa que as simulações prevêem pequenas capacidades de atenuação com a aplicação dos sistemas mistos, mas o Quadro 8-8 mostra que, ao contrário do que acontecia para o hietograma estudado anteriormente, a aplicação de canais dedicados com rugosidades elevadas, não traz grandes vantagens na maioria dos casos.

Quadro 8-8 - Atenuação da ponta de cheia em canais, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos ao hietograma de Coimbra a 8/10/2004

Rugosidade dos canais		Atenuação da ponta (%)					
		Canais a 1% de inclinação			Canais a 5% de inclinação		
n	K	Simples	Duplo em paralelo	Duplo em série	Simples	Duplo em paralelo	Duplo em série
0,013	77	1,8	6,7	5,3	0,5	0,5	3,4
0,025	40	7,1	24,6	18,9	1,5	2,5	14,2
0,03	33	8,7	32,6	22,8	2,0	3,4	19,2
0,05	20	34,9	55,9	47,9	5,6	8,2	36,4

O gráfico da Figura 8.11 mostra o andamento dos hidrogramas para inclinações de 5% e $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, comparando drenagem em colectores com drenagem em canais, para as configurações simples e em série, podendo observar-se o comportamento diferenciado da configuração em série (com boa percentagem de atenuação da ponta).

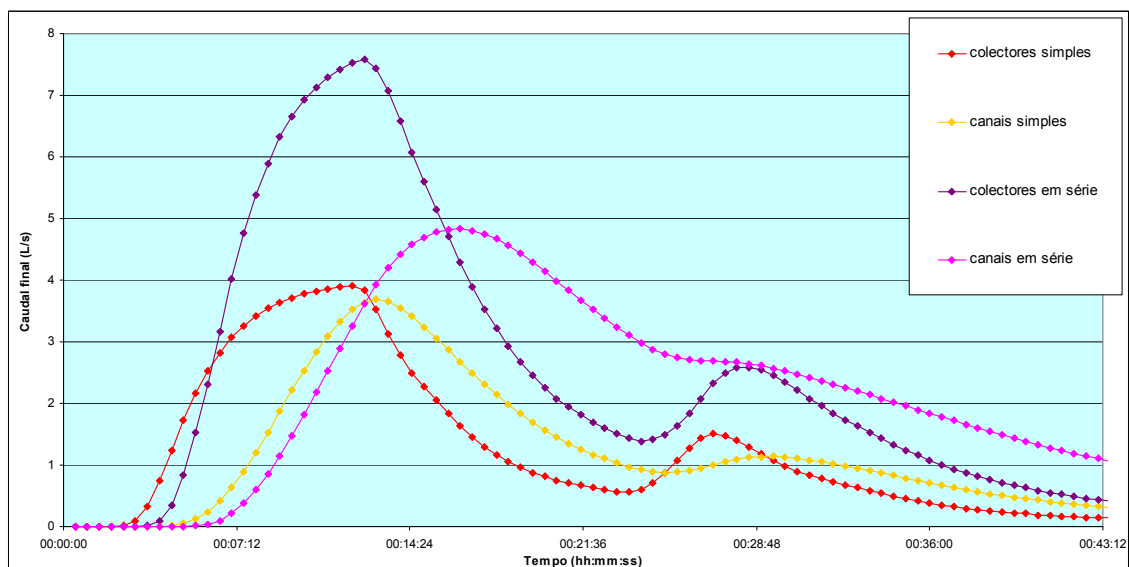


Figura 8.11 - Caudais no último troço do sistema, para a comparação de colectores simples com canais simples e para a duplicação dos sistemas em série (tudo com $i = 5\%$), sujeitos à precipitação correspondente ao hietograma de Coimbra a 8/10/2004

É interessante observar que os gráficos apontam para o que se esperava, uma relação entre a percentagem de atenuação da ponta de cheia e a diferença entre a duração da precipitação e o tempo de concentração da bacia. Para a bacia simples, verifica-se que a duração da precipitação constante é pouco menor que o tempo de concentração, visto que as duas curvas (vermelha e amarela) quase atingem um patamar em que seriam coincidentes. Já para a duplicação do sistema em série, por ter forma alongada, tem um maior tempo de concentração, pelo que o aumento da rugosidade num percurso mais longo é suficiente para aumentar de tal forma esse

tempo de concentração que a duração da chuvada é largamente ultrapassada e a atenuação acontece.

- *Hietograma de Coimbra a 23/10/1999*

O conjunto seguinte de resultados, refere-se às simulações feitas com base num hietograma caracterizado por um pico relativamente isolado de intensidade 45 mm/h durante 2 minutos, seguido de mais 2 minutos com intensidade de 69 mm/h. Este hietograma foi escolhido para analisar o comportamento dos sistemas face a picos isolados de intensidade elevada, mas com período de retorno curto, sendo o tipo de evento que se espera ter que gerir com grande frequência.

Os valores de percentagens de atenuação, no Quadro 8-9, apontam para boas eficiências de atenuação em todos os cenários com inclinações a 1%, e até resultados razoáveis para inclinações de 5%. No entanto, é de realçar que, para inclinações de 1%, as configurações de sistemas maiores (em paralelo e em série) têm piores desempenhos que o sistema simples de pequena dimensão, o que pode indicar que para este tipo de precipitação (pico isolado) pode haver perdas de eficiência com o aumento da dimensão da rede de drenagem.

Quadro 8-9 - Atenuação da ponta de cheia em sistemas mistos de canais e colectores, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos ao hietograma de Coimbra a 23/10/1999

Rugosidade dos canais		Atenuação da ponta (%)					
		Arruamento a 1% de inclinação			Arruamento a 5% de inclinação		
n	K	Simples	Duplo em paralelo	Duplo em série	Simples	Duplo em paralelo	Duplo em série
0,013	77	15,4	12,6	13,8	8,7	7,6	9,6
0,025	40	26,5	22,6	22,8	14,2	12,5	15,2
0,03	33	31,0	26,8	27,5	16,1	14,2	16,9
0,05	20	40,9	37,4	38,0	23,3	21,1	24,5

Para as inclinações de 5%, apesar de melhores resultados do que nas simulações com outros hietogramas, continua a fazer sentido advogar a utilização de canais dedicados à drenagem, mesmo que inseridos num sistema misto, visto que as atenuações conseguidas com as rugosidades das grelhas de enrelvamento sugeridas ainda são pequenas (12 a 15%).

O gráfico da Figura 8.12 mostra o andamento dos hidrogramas no último troço do sistema, para inclinações de 1% e canais com $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$. Pode observar-se que as simulações prevêem uma boa atenuação e atraso na ocorrência da ponta de cheia.

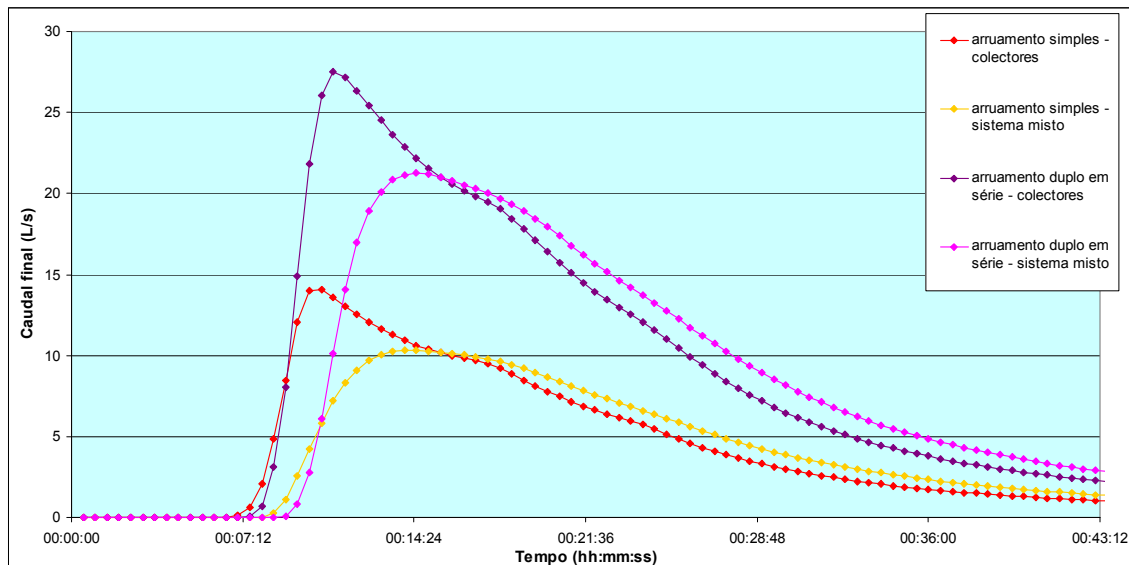


Figura 8.12 - Caudais no último troço do sistema, para a comparação de colectores simples com um sistema misto de canais e colectores (tudo com $i = 1\%$), sujeitos à precipitação correspondente ao hietograma de Coimbra a 23/10/1999

No contexto deste conjunto de simulações, e comparando com os resultados para o hietograma de 8/10/2004, observa-se que os sistemas têm muito bom desempenho a lidar com um pico isolado, e um desempenho menos bom com chuva de intensidade constante, apesar de o hietograma que apresenta o pico ter intensidades de precipitação muito maiores. A curta duração da chuvada implica que o volume total a escoar é menor e que há um melhor encaixe nos tempos de concentração das bacias. Os caudais máximos gerados nos dois casos, para os sistemas de colectores puros, são semelhantes, mas para a chuvada de maior duração a sua distribuição no tempo já funcionou como atenuação, pelo que é mais difícil introduzir atenuações através da configuração do sistema de drenagem.

- *Hietograma de Coimbra a 16/09/2002*

Considerando que já se tinha avaliado o desempenho dos sistemas quando expostos a hietogramas com intensidades relativamente constantes, bem como para picos isolados de grande intensidade, sentiu-se que seria interessante simular a exposição dos sistemas a um evento de precipitação que combinasse os dois tipos de

ocorrência: um pico de grande intensidade, inserido num hietograma de chuva intensa com uma duração relativamente longa. Escolheu-se um período de 20 minutos, que inclui 9 minutos a 38 mm/h ao início, seguido de 3 minutos a 88 mm/h e terminando com mais 8 minutos a 26mm/h. Para 20 minutos, este hietograma tem um período de retorno de 2 anos, apesar de para intervalos menores as intensidades não corresponderem a esse período de retorno.

Pelas percentagens de atenuação de caudais de ponta, apresentadas no Quadro 8-10, pode verificar-se que a capacidade de resposta dos sistemas piora quando a ponta da precipitação é precedida de um período de intensidade constante, suficientemente elevada para o sistema já estar a lidar com caudais consideráveis quando se dá a ocorrência da ponta.

Quadro 8-10 - Atenuação da ponta de cheia em sistemas mistos de canais e colectores, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos ao hietograma de Coimbra a 16/09/2002

Rugosidade dos canais		Atenuação da ponta (%)					
		Arruamento a 1% de inclinação			Arruamento a 5% de inclinação		
n	K	Simples	Duplo em paralelo	Duplo em série	Simples	Duplo em paralelo	Duplo em série
0,013	77	7,2	6,1	4,9	2,0	3,7	3,6
0,025	40	14,0	12,4	10,3	5,4	5,8	6,1
0,03	33	17,9	16,2	13,4	6,3	6,8	7,3
0,05	20	29,2	27,4	25,8	10,5	10,7	11,4

Para inclinações de 1%, a capacidade dos sistemas para lidar com este tipo de precipitação é limitada e só com canais com rugosidades de $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ valeria a pena considerar a sua aplicação. Para inclinações de 5%, as simulações indicam que os sistemas mistos não têm capacidade para lidar com este formato de precipitação.

A Figura 8.13 mostra os gráficos correspondentes aos hidrogramas do troço final de cada sistema (simples e em paralelo), para inclinações de 1% e canais com $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$. Podendo observar-se pelo andamento das curvas que, inicialmente, há algum atraso no crescimento dos caudais proporcionado pelos sistemas mistos, mas com a chegada da ponta de precipitação, esse atraso diminui e vai implicar uma menor atenuação do que ocorreria se essa inflexão da curva não se verificasse.

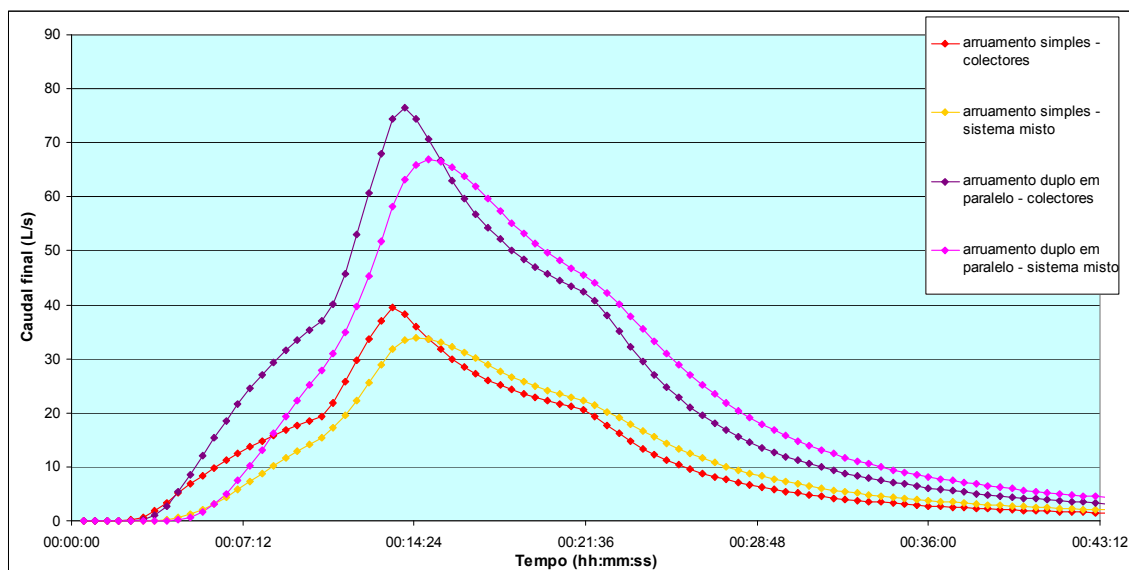


Figura 8.13 - Caudais no último troço do sistema, para a comparação de colectores simples com um sistema misto de canais e colectores (tudo com $i = 1\%$), sujeitos à precipitação correspondente ao hietograma de Coimbra a 16/09/2002

O comportamento de sistemas de canais puros, comparado com colectores, está patente no Quadro 8-11. Verificando-se desempenhos aceitáveis para inclinações de 1% (especialmente com grande rugosidade) no caso dos canais, mas com inclinações de 5% só a configuração em série dá resultados que façam valer a pena considerar esta solução para gerir eventos de precipitação do tipo a que estas simulações se referem.

Quadro 8-11- Atenuação da ponta de cheia em canais, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos ao hietograma de Coimbra a 16/09/2002

Rugosidade dos canais		Atenuação da ponta (%)					
		Canais a 1% de inclinação			Canais a 5% de inclinação		
n	K	Simple	Duplo em paralelo	Duplo em série	Simple	Duplo em paralelo	Duplo em série
0,013	77	7,5	10,4	10,3	2,2	2,9	8,2
0,025	40	16,7	22,8	21,1	8,6	9,0	18,5
0,03	33	19,2	27,1	23,4	10,5	11,4	21,7
0,05	20	31,8	45,0	38,1	17,7	17,9	33,4

Pelo gráfico da Figura 8.14, pode observar-se que o aumento do tempo de concentração que se consegue com a disposição em série, mas que a configuração em paralelo não consegue, faz com que os desempenhos de sistemas de dimensões semelhantes sejam completamente diferentes perante este hietograma.

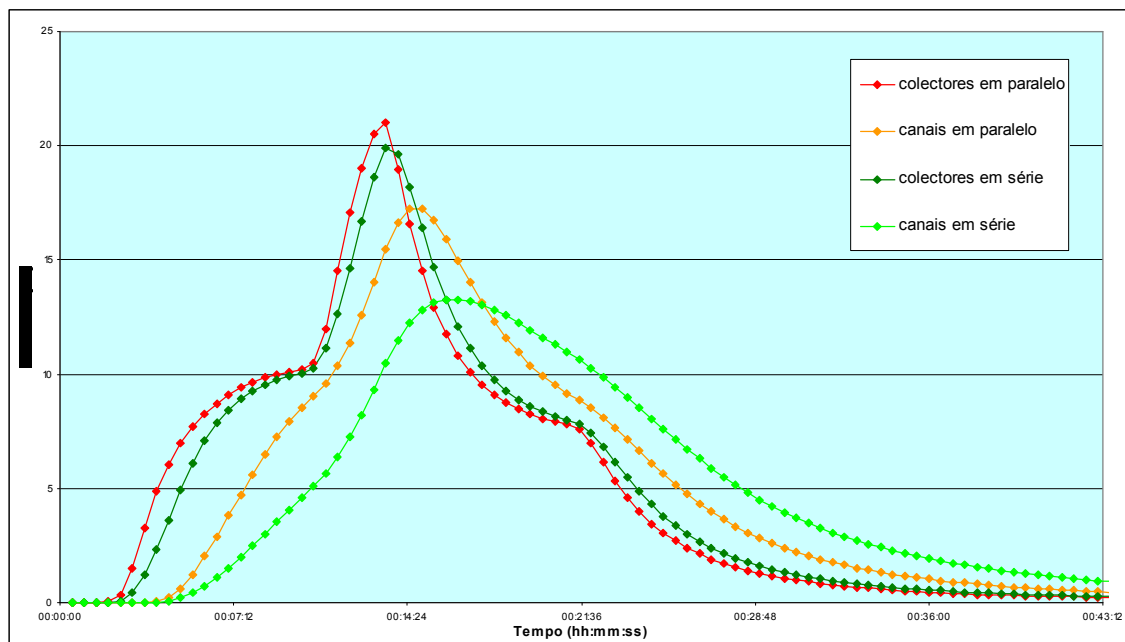


Figura 8.14 - Caudais no último troço do sistema, para a comparação de colectores com canais para a duplicação dos sistemas em paralelo e em série (tudo com $i = 5\%$ e canais com $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$), sujeitos à precipitação correspondente ao hietograma de Coimbra a 16/09/2002

Verifica-se que, face ao hietograma estudado nestas simulações, os sistemas mistos propostos não teriam capacidade de atenuação que justificasse a sua utilização, tendo que se recorrer a canais dedicados, com grandes rugosidades, para conseguir os atrasos necessários à redução eficiente dos caudais de ponta.

Os resultados deste conjunto de simulações apontam, mais uma vez, para a grande importância da relação entre o tempo de concentração das bacias e a duração da precipitação. O que seria relevante estudar mais aprofundadamente é a influência desta relação em bacias urbanas de maiores dimensões, e se os benefícios que se conseguem na pequena escala se conseguem transportar para a escala maior dos sistemas de drenagem urbana reais.

8.4 Ajustes ao modelo em função dos resultados

Dado que as simulações efectuadas com os sistemas mistos apresentam resultados que fazem esperar capacidades de atenuação significativamente menores do que em sistemas só de canais, considerou-se útil ajustar os modelos dos arruamentos para dar maior importância ao escoamento em canal do que em colector. Assim, alterou-se o desenho dos nós de divisão de caudais, para que fosse direccionada mais água para

os canais de jusante do que anteriormente, com recurso à diminuição do diâmetro e subida da cota de entrada (para meia altura da caixa de divisão de caudais) dos ramais que ligam os canais aos colectores.

Feitas estas alterações correu-se um conjunto de simulações com recurso aos hietogramas representativos das IDF de Lisboa (T=2, 20 e 100anos) utilizados anteriormente, para rugosidades de $K = 40$ e $20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, tanto com inclinações de 1% como de 5%. Compararam-se então os resultados com os anteriormente obtidos.

No Quadro 8.12 pode observar-se as percentagens de atenuação de caudais de ponta obtidas para as simulações efectuadas com os vários modelos de configuração de sistemas mistos, após introduzidas as alterações acima referidas. Marcadas a amarelo estão as células que apresentam piores eficiências de atenuação do que antes da introdução de alterações.

Quadro 8.12 - Atenuação da ponta de cheia em sistemas mistos de canais e colectores, como percentagem do caudal gerado num sistema de colectores equivalente, sujeitos às IDF de Lisboa para T = 2, 20 e 100 anos

Configuração:		Simples		Paralelo		Série	
Inclinação:		1%	5%	1%	5%	1%	5%
Hietogramas							
K = 40 $\text{m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$	IDF Lisboa T = 2 anos	20,8	12,8	17,3	9,9	17,8	14,4
	IDF Lisboa T = 20 anos	13,8	13,2	11,6	10,6	16,7	17,5
	IDF Lisboa T = 100 anos	11,3	14,2	8,0	12,3	20,9	21,3
K = 20 $\text{m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$	IDF Lisboa T = 2 anos	37,7	19,3	34,2	17,1	37,4	18,5
	IDF Lisboa T = 20 anos	31,1	15,8	28,2	14,1	23,5	18,9
	IDF Lisboa T = 100 anos	29,8	15,4	26,0	14,5	28,5	21,7

Os resultados indicam que, para eventos extremos, a capacidade de atenuação diminui em muitos dos cenários considerados para inclinações de 1%, enquanto que para inclinações de 5% o desempenho melhora em todos os casos (mesmo que pouco). Uma possível explicação para estas piores eficiências é a de que, privilegiando a drenagem em canal, a água só começa a ser encaminhada para colector quando se atinge o caudal de ponta dos canais, fazendo com que as velocidades de escoamento superiores em colector levem o caudal de ponta dos colectores a “apanhar” o caudal de ponta dos canais, juntando os dois no último troço. No modelo original, a divisão equitativa de caudais pelos canais e colectores implica que a velocidade mais elevada nos colectores leva o caudal de ponta destes a desfazer-se do dos canais, pelo que passam no último troço em momentos diferentes.

O efeito atrás descrito não se faz sentir para eventos frequentes por, no modelo alterado, haver pouco caudal desviado para colector, pelo que não se constitui uma ponta relevante para somar à que escoa nos canais.

8.5 Discussão de padrões e tendências nos resultados

Para as simulações efectuadas com os hietogramas baseados nas curvas IDF de Lisboa, verifica-se que as tendências nos resultados são diferenciadas em função das inclinações consideradas para os sistemas.

Simulações com as IDF de Lisboa para inclinações de 1%

Para sistemas mistos de canais e colectores com inclinações de 1%, quando se simula o comportamento dos sistemas face a eventos frequentes, os resultados apontam para uma diminuição da eficiência de atenuação das pontas de cheia com o aumento da dimensão do sistema, com um desempenho ligeiramente melhor para a configuração em paralelo do que para a configuração em série. Esta diferença de desempenho está em linha com o que se espera pelo aumento de tempos de concentração introduzidos em relação aos sistemas de colectores puros.

Quadro 8-13 - Aumentos dos tempos de concentração dos sistemas mistos, quando comparados com sistemas de colectores equivalentes.

Rugosidade dos canais		Aumentos de Tc para i=1% em Sistemas Mistos					
		(minutos)			(%)		
n	K	Simple	Paralelo	Série	Simple	Paralelo	Série
0,013	77	2,0	1,5	1,5	5	4	4
0,025	40	2,5	3,0	2,5	7	7	6
0,03	33	4,0	4,0	3,5	11	10	9
0,05	20	8,5	9,0	8,0	23	22	20

Já para eventos extremos, nas mesmas condições, os resultados para a configuração em série são melhores do que aqueles do sistema simples (menor dimensão) e do sistema em paralelo. Considera-se que esta discrepância inesperada pode estar relacionada com o facto de o sistema em série não desmultiplicar o colector central, fazendo com que, para caudais elevados (associados aos hietogramas de T = 20 e 100 anos) este entre em pressão, fazendo com que seja o diâmetro do colector a limitar o caudal de ponta. Na Figura 8.15 pode ver-se a linha piezométrica que nos

indica o funcionamento do colector em pressão durante a ocorrência da ponta de cheia.

Contar com o facto de, para intensidades maiores que as de projecto, ser a própria incapacidade do sistema em lidar com esses volumes de escoamento a fazer a atenuação da ponta não era o que se pretendia, apesar de funcionar.

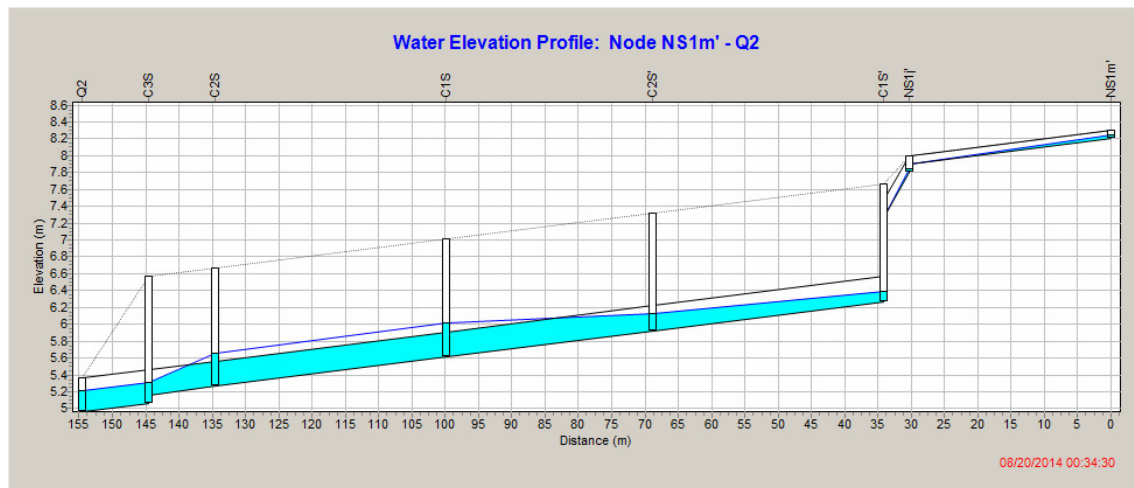


Figura 8.15 - Perfil dos colectores do sistema misto em situação de ponta, com a respectiva linha piezométrica (para $i = 1\%$ e canais com $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$) sujeitos à IDF de Lisboa $T = 20$ anos (imagem do SWMM)

Este efeito da entrada dos sistemas em pressão também pode justificar o facto de, para a configuração em série, os resultados das simulações apresentarem um aumento do desempenho na atenuação dos caudais de ponta com o aumento da precipitação, ao passo que para as outras configurações o efeito é o inverso, ou seja, diminuição da capacidade de atenuação para precipitações mais intensas.

Relativamente às simulações que comparam o comportamento de sistemas de canais puros com colectores puros para inclinações de 1%, os resultados das simulações apontam para um aumento do desempenho de atenuação com o aumento da dimensão dos sistemas. Este comportamento é o que se esperava, em função das diferenças de tempos de concentração entre os sistemas de canais e os de colectores, sendo que essas diferenças são mais pronunciadas para sistemas de maior dimensão, como se verifica pela análise do Quadro 8-14.

Quadro 8-14 - Aumentos dos tempos de concentração dos sistemas de canais, quando comparados com sistemas de colectores equivalentes.

Rugosidade dos canais		Aumentos de Tc para i=1% em Canais					
		(minutos)			(%)		
n	K	Simples	Paralelo	Série	Simples	Paralelo	Série
0,013	77	1,0	2,0	2,0	6	10	10
0,025	40	2,5	5,5	3,0	16	27	15
0,03	33	2,0	6,5	2,5	13	32	13
0,05	20	10,0	24,0	12,0	63	117	60

Quanto à relação entre a atenuação das pontas de cheia e as intensidades de precipitação, os resultados mostram uma diminuição da capacidade de atenuação para precipitações mais intensas.

Simulações com as IDF de Lisboa para inclinações de 5%

Simulando o comportamento de sistemas mistos de canais e colectores com inclinações de 5%, observa-se que as percentagens de atenuação das pontas de cheia variam pouco em função das configurações do sistema, ou das intensidades de precipitação, tornando o dimensionamento da rugosidade dos canais a única forma prática de gerir o nível de atenuação que se pretende. Mesmo assim, os desempenhos de atenuação são baixos, rondando os 15% para os melhores cenários (todos com canais de rugosidade $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$).

Os resultados das simulações com canais puros mostram um aumento do desempenho de atenuação das pontas de cheia quando se duplica o sistema em série, mas para a duplicação em paralelo o comportamento varia com as intensidades de precipitação: o desempenho piora no caso de eventos frequentes, mas melhora para eventos extremos. Em qualquer caso, com rugosidades elevadas, as simulações prevêem reduções de 30 a 40% nos caudais de ponta.

O aumento da intensidade de precipitação faz diminuir a capacidade de atenuação de pontas dos sistemas de canais, à excepção da configuração em paralelo, para a qual se calculou o melhor desempenho para precipitações de $T = 20$ anos.

Simulações com hietogramas de eventos reais

Os resultados das simulações realizadas com o hietograma de São João da Talha corroboram as conclusões tiradas para eventos frequentes, com base na IDF de Lisboa para $T = 2$ anos, no que se refere aos cenários com inclinações de 1%, apontando para uma diminuição da atenuação de caudais de ponta com o aumento da dimensão do sistema, no caso de sistemas mistos, e um aumento da atenuação com o aumento da dimensão para sistemas de canais. O sistema em Paralelo dá melhores resultados que o sistema em série para sistemas mistos e o sistema em série dá melhores resultados para canais puros.

Ainda no caso das simulações com o hietograma de São João da Talha, mas para inclinações de 5%, os resultados são diferentes dos obtidos para a IDF de Lisboa com $T = 2$ anos, no sentido em que as eficiências de atenuação aumentam com o aumento de dimensão dos sistemas, tanto para canais como para sistemas mistos, sendo a configuração em série a que dá melhores resultados.

Para o hietograma de Coimbra de 8/10/2004 e inclinações de 1%, nas simulações de sistemas mistos os resultados apontam para uma diminuição da atenuação para o aumento do sistema em série e manutenção da eficiência de atenuação para o aumento da dimensão em paralelo. Face a este hietograma só se obtêm boas atenuações da ponta de cheia para canais com $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$.

Para inclinações de 5%, as percentagens de atenuação da ponta de cheia são sempre pequenas, apesar de os resultados indicarem uma ligeira melhoria para o caso da duplicação do sistema em série.

Nas simulações de sistemas de canais puros, ainda com o hietograma de Coimbra de 8/10/2004, os resultados indicam que as eficiências de atenuação de pontas aumentam com o aumento de dimensão do sistema, sendo bastante boas (até 55% com $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$) no sistema em paralelo para inclinações de 1%, ao passo que para inclinações de 5% é o sistema em série que dá melhores resultados, com atenuações de ponta de cheia razoáveis (até 36% com $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$).

Os resultados obtidos nas simulações com o hietograma de Coimbra de 23/10/1999 indicam boa capacidade dos vários sistemas avaliados em atenuar as pontas de cheia

causadas por este tipo de precipitação (pico isolado). Apesar dos bons resultados, há que ter em consideração que o modelo prevê uma redução da capacidade de atenuação com o aumento da dimensão dos sistemas, para sistemas mistos.

Para sistemas de canais puros, com inclinações de 1% verifica-se um aumento do desempenho de atenuação com o aumento do sistema, sendo a configuração em paralelo a que dá melhores resultados. Por sua vez, com inclinações de 5%, a atenuação diminui ligeiramente com o aumento do sistema em paralelo, mas aumenta bastante com a duplicação em série.

Sabendo que o hietograma da série de Coimbra de 16/09/2002 foi escolhido por, em princípio, ter características difíceis de gerir pelos sistemas propostos, ainda assim os resultados das simulações apontam para cenários em que é possível conseguir uma atenuação razoável em relação à ponta de cheia gerada em sistema de colectores.

Para sistemas mistos com inclinações de 1%, observa-se uma diminuição da atenuação com o aumento de dimensão dos sistemas, ainda assim com sistemas em paralelo, para canais com $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, a atenuação calculada é de 27%. No caso de inclinações de 5%, as percentagens de atenuação são pequenas (10% ou menos), notando-se uma ligeira vantagem para a configuração em série quando comparada com as outras.

Para sistemas de canais puros, os resultados das simulações dão boas atenuações de caudais de ponta para inclinações de 1%, com a vantagem acrescida de se observar um aumento da eficiência de atenuação com o aumento da dimensão dos sistemas, com a configuração em paralelo a levar vantagem. Com inclinações de 5%, apesar de os resultados apontarem para uma melhoria da eficiência com o aumento da dimensão do sistema, só a configuração em série apresenta percentagens de atenuação do caudal de ponta que justifiquem a sua aplicação (33% com $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$).

Simulações com alterações aos nós de divisão de caudais

Ao avaliar o desempenho dos sistemas mistos com a alteração aos nós de divisão de caudais, que permite privilegiar o escoamento em canal sobre o escoamento em colector, observou-se que para inclinações de 5% é sempre vantajosa esta reconfiguração relativamente à abordagem inicial, mas apesar disso, ainda não se conseguem resultados próximos do que se calculou para sistemas só de canais, pelo que será importante estudar outras formas de tornar o comportamento dos sistemas mais próximo do de canais puros.

Já para inclinações de 1% e rugosidade dos canais de $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, as simulações apontam sempre para uma perda de eficiência para eventos extremos ($T = 20$ e 100 anos) e os ganhos obtidos para eventos frequentes ainda não justificam a sua aplicação, pelo que continuamos a considerar este valor de rugosidade como insuficiente para uma boa atenuação de caudais de ponta. Por outro lado, no caso de rugosidades de $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, apresenta-se-nos um dilema: tanto para a configuração em paralelo como em série, temos melhores desempenhos de atenuação de caudais de ponta, nas simulações efectuadas com o hietograma correspondente à IDF de Lisboa para $T = 2$ anos, sendo a configuração em série a mais vantajosa, mas para períodos de retorno maiores há perda de eficiência na configuração em série, e os ganhos para a configuração em paralelo são pequenos.

Levanta-se a questão: valerá a pena optar por dar mais peso ao escoamento em canal, e dessa forma gerir melhor os eventos “de todos os anos”, com a noção de que teremos pior capacidade de resposta aos eventos extremos?

Parece-nos que a opção que temos vindo a descrever não é particularmente vantajosa, por dois motivos: em primeiro lugar, porque o dimensionamento dos sistemas tem que ser feito a contar com os eventos extremos, pelo menos com tempos de retorno na ordem dos 20 anos, sendo que um sistema com capacidade para lidar com os caudais gerados na chuvada de 20 anos não precisa de “ajudas” para lidar com eventos frequentes; em segundo lugar, optar por dar mais peso ao escoamento em canais é contra-intuitivo em drenagem urbana, levaria a mais ocasiões em que teríamos cidadãos descontentes por terem os pés molhados, apesar de estarmos a ajudar outros a jusante a manter as caves secas.

A alteração que se experimentou no desenho dos sistemas, mesmo tendo falhado no seu objectivo principal de obter uma solução que proporcionasse melhores resultados nas simulações, leva-nos a considerar a importância que a divisão de caudais no tempo pode ter. Se neste caso se verificaram problemas por só encaminhar caudais para colector mais tarde do que para canais, que outros efeitos se podem conseguir influenciando a variável tempo?

Configurações dos sistemas de drenagem

Dado que um sistema de drenagem urbana não é constituído por um arruamento apenas, como no modelo que serviu de base a esta análise, os resultados das simulações com esse modelo duplicado, sujeito às mesmas condições, podem servir de indicador para prever o comportamento de sistemas maiores em situações semelhantes, dar uma noção da tendência de alteração no comportamento dos sistemas à medida que a sua dimensão aumenta.

Com base na hipótese acima descrita, elaborou-se o Quadro 8-15 em que se indica para cada cenário de precipitação, inclinação e tipo de sistema (sistemas mistos de canais e colectores ou sistemas de canais puros), qual a configuração de aumento da dimensão do sistema que dá melhores resultados de atenuação de caudais de ponta (em série ou em paralelo), para as simulações efectuadas. Dado que a maior rugosidade simulada ($K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$) dá consistentemente os melhores resultados, apresenta-se as percentagens de atenuação calculadas nessas condições.

Note-se que nenhum destes valores corresponde aos cálculos efectuados com os nós de divisão de caudais alterados, por se ter considerado que os ganhos situacionais proporcionados não justificam as desvantagens em outros cenários.

Adoptou-se um código de cores para mostrar a relação entre a atenuação de caudais de ponta e a dimensão do sistema: uma célula a verde significa que a configuração dupla que aparece no quadro tem melhor desempenho que a configuração simples correspondente; uma célula a amarelo significa que a configuração dupla que aparece no quadro tem pior desempenho que a configuração simples correspondente.

Quadro 8-15 - Configurações com melhores resultados para aumento da dimensão dos sistemas (canais com $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$) e respectivas percentagens de atenuação de caudais de ponta, comparando com sistema de colectores equivalente

	Sistemas Mistos ($K=20\text{m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$)				Canais ($K=20\text{m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$)			
	Inclinação 1%		Inclinação 5%		Inclinação 1%		Inclinação 5%	
Hietogramas	Config.	Atenua.	Config.	Atenua.	Config.	Atenua.	Config.	Atenua.
IDF Lisboa T = 2 anos	Paralelo	22%	Série	15%	Paralelo	54%	Série	44%
IDF Lisboa T = 20 anos	Série	27%	Série	15%	Paralelo	51%	Série	42%
IDF Lisboa T = 100 anos	Série	30%	Série	15%	Paralelo	49%	Série	40%
São João da Talha	Paralelo	21%	Série	9%	Paralelo	40%	Série	32%
Coimbra 8/10/2004	Paralelo	35%	Série	12%	Paralelo	56%	Série	36%
Coimbra 23/10/1999	Série	38%	Série	24%	Paralelo	65%	Série	56%
Coimbra 16/09/2002	Paralelo	27%	Série	11%	Paralelo	45%	Série	33%

Da análise deste quadro, podemos observar que os resultados apontam para a baixa capacidade de atenuação de caudais de ponta por sistemas mistos de canais e colectores para inclinações de 5%, pelo que não se recomenda a sua aplicação nestas condições, devendo estudar-se a possibilidade de implementar sistemas de canais dedicados ou outras formas de atenuação de pontas (e.g. bacias de retenção).

Já para inclinações de 1%, as simulações efectuadas para sistemas mistos indicam que se pode contar com atenuações razoáveis, desde que as rugosidades dos canais sejam na ordem de $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, pelo que será necessário encontrar um tipo de pavimento que possa ser usado com fins múltiplos em meio urbano com este nível de rugosidade. Seria interessante avançar com ensaios laboratoriais para testar a resistência ao escoamento de diferentes soluções de revestimento do solo.

Quanto à configuração a utilizar para ligar entre si as micro-bacias que constituem um sistema de drenagem urbana, os resultados apontam para uma vantagem clara da configuração em série em inclinações de 5%. Para inclinações de 1%, os sistemas só de canais parecem beneficiar da configuração em paralelo. Para sistemas mistos, as simulações efectuadas indicam que as vantagens duma ou outra configuração variam com o tipo de precipitação que se tem que gerir: a configuração em série leva vantagem no caso de picos de precipitação intensa, relativamente isolados no meio de precipitações de fraca intensidade; e a configuração em paralelo parece ser melhor para gerir intervalos de tempo relativamente longos (cerca de 10 minutos ou mais) de precipitação intensa, ou picos de intensidade mais fraca.



9. Conclusões

Do desenvolvimento deste trabalho retira-se, como principal conclusão, que é expectável conseguir atenuações nos caudais de ponta de cheia na ordem dos 30%, recorrendo ao aumento da resistência ao escoamento, podendo mesmo vir a ter reduções mais significativas. A solução originalmente proposta, com canais de rugosidade $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ não é vantajosa, porque apesar de permitir obter resultados aceitáveis nalgumas situações não dá segurança de ter um desempenho adequado em todas as condições, pelo que devem usar-se revestimentos com rugosidades de $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, pelo menos.

Encontrou-se também uma relação entre a forma como se faz a disposição dos sistemas de drenagem, no que toca à ligação das pequenas sub-bacias entre si, e as inclinações dos canais e colectores que compõem o sistema. Sendo que as ligações em paralelo, mais ramificadas, dão melhores resultados quando aplicadas a inclinações de 1%, e a disposição em série, mais linear, tem melhor desempenho de atenuação para inclinações de 5%. Em geral a configuração de alinhamento de sub-bacias em série, com cada bacia a receber os caudais da anterior, dá melhores atenuações para uma maior gama de cenários.

9.1 Recomendações

É importante referir o que se considera ser a sequência lógica para a continuação deste estudo. Para além de ensaios laboratoriais de resistência aos escoamentos, já referido anteriormente, seria importante estudar o comportamento dos sistemas para inclinações intermédias entre 1 e 5%, bem como avaliar comparativamente o desempenho de sistemas com inclinações diferentes em diversas partes do seu percurso e comparar os desempenhos de sistemas de canais ou mistos com sistemas de colectores de configuração diferente (remover parte da condição de *Ceteris Paribus*).

Outra questão importante a avaliar é a possível contribuição da infiltração para a atenuação de caudais de ponta, e verificar se os efeitos acumulados da resistência ao escoamento e da infiltração são suficientes para obter boas percentagens de atenuação de pontas, ou se por outro lado, ainda será necessário recorrer à retenção para dar fiabilidade aos sistemas.

Considera-se que também seria interessante estudar vários cenários de estruturas de controlo para a divisão dos caudais entre escoamento superficial e em colector, permitindo ajustar a melhor relação entre as velocidades de escoamento diferenciadas nos dois meios e os tempos de concentração das bacias.

Para além de evoluir na simulação de modelos conceptuais, avançando no sentido de avaliar combinações mais complexas de sistemas, nomeadamente redes de drenagem com canais em algumas áreas e colectores puros noutras, é de extrema importância a evolução do estudo para uma maior avaliação de casos reais (e.g. bacia de Sacavém).

Bibliografia

Andoh, R. Y. G., Stephenson, A. J., & Collins, P. (2005). APPROACHES TO URBAN DRAINAGE SYSTEMS MANAGEMENT FOR THE 21ST CENTURY. In National Hydrology Seminar 2005 (pp. 69–76).

Balmforth, D., Digman, C., Kellagher, R., & Butler, D. (2006). Designing for exceedance in urban drainage – good practice. London: CIRIA.

Brandão, C., Rodrigues, R., & Costa, J. P. (2001). ANÁLISE DE FENÓMENOS EXTREMOS PRECIPITAÇÕES INTENSAS EM PORTUGAL CONTINENTAL. Lisboa.

Center for Watershed Protection. (2012). West Virginia Stormwater Management and Design Guidance Manual. West Virginia Department of Environmental Protection. Retrieved from <http://www.dep.wv.gov/WWE/Programs/stormwater/MS4/Pages/default.aspx>

Coombes, P., & Paskin, R. (2003). Water sensitive homes: Practice Note 1. Sydney: Lower Hunter and Central Coast Regional Environmental Management Strategy. Retrieved from www.wsud.org

Department of Planning and Local Government. (2009). Water Sensitive Urban Design Technical Manual for the Greater Adelaide Region. Advances in the science of Victorian brown coal. Adelaide: Government of South Australia. Retrieved from <http://www.ee.ncu.edu.tw/~jfli/test1/lecture08/ch01.pdf>

Fryd, O., Backhaus, a, Birch, H., Fratini, C. F., Ingvertsen, S. T., Jeppesen, J., ... Jensen, M. B. (2013). Water Sensitive Urban Design retrofits in Copenhagen - 40% to the sewer, 60% to the city. *Water Science and Technology*: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 67(9), 1945–52. doi:10.2166/wst.2013.073

Fryd, O., Backhaus, A., Jeppesen, J., Bergman, M., Ingvertsen, S. T., Birch, H., ... Fratini, C. (2009). Connected Disconnections: River Harrestrup Case Study. Copenhagen.

Graham, A., Day, J., Bray, B., & Mackenzie, S. (2012). Sustainable drainage systems: Maximising the potential for people and wildlife: A guide for local authorities and developers. Hydraulic, Structural and Water Quality

Hao, X. (2010). Universal recycling for the benefit of society – moving towards sustainable water use. *Water* 21, (12.6), 14–16.

Interlocking Concrete Pavement Institute. (2006). ICPI Tech Spec No. 8 - Concrete grid pavements. Herndon.

Iowa Department of Natural Resources. (2010). Iowa Stormwater Management Manual. Des Moines. Retrieved from <http://www.iowadnr.gov/Environment/WaterQuality/WatershedImprovement/WatershedBasics/Stormwater/StormwaterManual.aspx>

Lencastre, A., & Franco, F. M. (2006). Lições de Hidrologia (3a Edição.). Caparica: Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia: Universidade Nova de Lisboa.

León, M., Gutiérrez, L., & Salazar, J. (2011). Sistema Urbanos de Drenaje Sostenible. Bogotá.

Li, L., & Davis, A. P. (2014). Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems. *Environmental Science & Technology*, 48(6), 3403–10. doi:10.1021/es4055302

Liqing, L., & Davis, A. (2014). Urban Stormwater Runoff Nitrogen Composition and Fate in Bioretention Systems. *Environmental Science & Technology*, 48, 3403–3410. Retrieved from <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es4055302>

Marsalek, J., Ashley, R., Chocat, B., Matos, M. R., Rauch, W., Schilling, W., & Urbonas, B. (2007). Urban drainage at cross-roads□: Four future scenarios ranging from business-as-usual to sustainability. In V. Novotny & P. Brown (Eds.), *Cities of the Future: Towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management*. London: IWA Publishing.

Matos, J. de S., & Frazão, A. (2001). O SANEAMENTO NA CIDADE DO SÉCULO XXI – PROBLEMAS, PARADIGMAS E SOLUÇÕES. Lisboa: Encontro Nacional de Entidades Gestoras, ENEG 2001.

Miguez, M. G., & Rezende, O. M. (2012). URBAN DRAINAGE TRENDS – A PATHWAY TOWARDS MORE SUSTAINABLE SOLUTIONS TENDENCIAS DE DRENAJE URBANO – UN CAMINO HACIA SOLUCIONES MÁS SOSTENIBLES Marcelo Gomes Miguez* Osvaldo Moura Rezende*. *Aqua-LAC*, 4(2), 69–83.

Miguez, M. G., Veról, A. P., & Carneiro, P. R. F. (2012). Sustainable Drainage Systems: An Integrated Approach, Combining Hydraulic Engineering Design, Urban Land Control and River Revitalisation Aspects. (M. S. Javaid, Ed.) *Drainage Systems*. Rijeka: InTech. Retrieved from <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/30387.pdf>

Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações. Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais (1995). Conselho de Ministros.

Minnesota Stormwater Steering Committee. (2006). Minnesota Stormwater Manual. St. Paul: Minnesota Pollution Control Agency. Retrieved from www.pca.state.mn.us/water/stormwater/stormwater-manual.html

MWH UK LTD. (2014). Managing urban flooding from heavy rainfall - encouraging the uptake of designing for exceedance: Literature Review (April 2014). London. Retrieved from <http://www.ciria.org/>

Olszewski, J., & Davis, A. (2013). Comparing the hydrologic performance of a bioretention cell with predevelopment values. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(2), 124–131. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774

Pitt, R. (2004). Detention Pond Design and Analysis CE 378 Water Resources Engineering, 1–52. Retrieved from <http://unix.eng.ua.edu/~rpitt/Class/Water Resources Engineering/M9c2 WinTR55 ponds docs.pdf>

Poleto, C. (2011). SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems): Uma Contextualização Histórica. *Revista Thema*, 08(01). Retrieved from <http://revistathema.ifsul.edu.br/index.php/thema/article/viewArticle/38>

Prince George's County Department of Environmental Resources: Programs and Planning Division. (1999a). Low-Impact Development Design Strategies - An Integrated Design Approach. Maryland.

Prince George's County Department of Environmental Resources: Programs and Planning Division. (1999b). Low-Impact Development Hydrologic Analysis. Maryland.

Quintela, A. de C. (2002). *Hidráulica* (8a Edição.). Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

Santos, J. (2010). *GESTÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS: MUDANÇA DO PARADIGMA NOS SISTEMAS PÚBLICOS DE DRENAGEM - Um Caso Aplicado à Cidade do Porto*. Universidade do Porto.

Schuetze, T., & Chelleri, L. (2013). Integrating Decentralized Rainwater Management in Urban Planning and Design: Flood Resilient and Sustainable Water Management Using the Example of Coastal Cities in The Netherlands and Taiwan. *Water*, 5(2), 593–616. doi:10.3390/w5020593

SEMCOG: Southeast Michigan Council of Governments. (2008). Low Impact Development Manual for Michigan: A Design Guide for Implementors and Reviewers. Detroit. Retrieved from www.semcog.org

Stagge, J. H., Davis, A. P., Jamil, E., & Kim, H. (2012). Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff. *Water Research*, 46(20), 6731–42. doi:10.1016/j.watres.2012.02.037

Stahre, P. (2008). Blue-Green Fingerprints in the City of Malmö, Sweden. Malmö. Retrieved from www.vasyd.se/fingerprints

Struck, S., Borst, M., Muthukrishnan, S., Selvakumar, A., & O'Connor, T. (2007). Approaches for Determining Swale Performance for Stormwater Runoff, 1–9. Retrieved from [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40927\(243\)41](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40927(243)41)

Tsavidaris, A. (2012). SUDSnet International Conference (4-6 September 2012) An investigation in the hydraulic and treatment performance of vegetated SuDS, (September).

United Nations. (1987). Our common future.

Viavattene, C., & Ellis, J. B. (2013). The management of urban surface water flood risks: SUDS performance in flood reduction from extreme events. *Water Science and Technology* □: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 67(1), 99–108. doi:10.2166/wst.2012.537

Weiss, P. T., Gulliver, J. S., & Erickson, A. J. (2010). The Performance of Grassed Swales as Infiltration and Pollution Prevention Practices: A LITERATURE REVIEW.

Wong, T. H. F. (2006). Water Sensitive Urban Design – th Journey Thus Far. *Australian Journal of Water Resources*, 10(3), 213–222.

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, B., & Shaffer, P. (2007). The SUDS manual (Vol. 44). CIRIA, Classic House, 174–180 Old Street, London EC1V 9BP, UK All.

Zhou, Q. (2014). A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. *Water*, 6(4), 976–992.
doi:10.3390/w6040976

Zhou, Q., Panduro, T. E., Thorsen, B. J., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2013). Adaption to extreme rainfall with open urban drainage system: an integrated hydrological cost-benefit analysis. *Environmental Management*, 51(3), 586–601.
doi:10.1007/s00267-012-0010-8